



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 석사학위논문

기후변화에 따른 PCDDs/DFs와
휘발성유기화합물의 동태변화의 비교분석

2013년 8월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과

장 리 아

국문초록

기후 변화로 인한 환경 조건의 변화는 화학물질의 환경 중 동태에 영향을 끼친다. 이러한 환경 중 화학물질의 동태 변화는 사람과 생태계에 대한 노출의 변화를 가져오며, 이에 따라 위해성이 달라질 수 있음을 의미한다.

본 연구에서는 서로 뚜렷하게 다른 물리화학적 특성을 가진 10종의 휘발성유기화합물과 17종의 PCDDs/DFs를 대상으로 기후변화 영향에 따라 나타나는 환경 중 동태 차이를 비교 평가하고자 하였다. 이를 위하여 매질 내부 뿐 아니라 매질 간 이동을 하는 화학물질의 기후변화에 의한 환경 중 동태의 변화를 추적할 수 있도록 KPOP-CC 다매체 모형을 이용하였다. 또한 기후변화의 영향을 반영하기 위해 A1B 시나리오에 따른 기상자료를 사용하여 실행된 모형 값과 현재 기상조건하에서 실행된 모형 값을 비교하여 분석하였다.

연구 결과 기후변화로 인한 화학물질의 환경 중 동태에 큰 영향을 미치는 기상 인자는 온도보다는 풍속과 강수패턴의 변화로 분석되었다. VOCs는 바람에 의한 제거의 증가가 대기 농도 감소의 가장 중요한 감소이유였고, PCDDs/DFs는 기후변화로 인한 강수빈도의 증가로 입자상 흡착침적에 의하여 대기에서 하부매질로의 이동이 증가하였다. 강수 빈도의 증가로 대기로부터 토양으로의 유입량이 증가된 PCDDs/DFs의 경우, 강수량 증가로 인하여 늘어난 토사 유출에 의해 오염물이 토양에서 수체로 이동되어 수체의 농도를 증가시키는 결과를 보였다. 증기압이 높아 대기 중 기체상으로 존재하는 비율이 높은 VOCs보다 낮은 증기압으로 인해 입자상으로 대부분 존재하는 PCDDs/DFs가 입자상 흡착침적에 의한 이동량이 증가하였고, 이는 다시 유기물로의 분배 경향이 높은 물질일수록 토양에서 토사 유출에 의하여 수체로의 이동을 증가시켰다. 따라서 입자상 및 유기물로의 분배 경향이 높은 물질일수록 수체와 저토로 이동하여 수서 및 저서생태계의 건강을 위협할 가능성이 큼을 암시한다.

따라서 보다 의미 있는 인체 및 수서·저서생태계 노출에 따른 화학물질의 위해성 평가를 위하여 향후 시공간적 해상도를 달리하여 화학물질의 기후변화 영향을 연구하고 다양한 화학물질의 물성과 기후시나리오를 반영하여 기후변화의 영향을

예측하는 연구들이 필요할 것이다.

◆ 주요어 : 다매체 거동, 기후 변화, 휘발성유기화합물, 다이옥신류화합물, 다매
체동태모형

◆ 학 번 : 2010-22335

<목차>

I . 서론	1
1. 연구의 배경 및 목적	1
II . 기존연구의 고찰	4
1. 기후변화가 POPs 및 VOCs 동태에 미치는 영향 연구	4
2. 다매체 모형 연구	5
III . 모형 연구	7
1. 물질수지방정식	9
2. 모형의 주요 반영 모듈	10
1) 대기	10
2) 토양	10
IV . 연구 방법	13
1. 연구의 방법	13
2. 연구의 범위	16
V . 결과와 고찰	17
1. 기후변화시나리오에 따른 기상변화	17
2. 예측 결과	23
1) 농도	23
2) 기후변화시나리오에 따른 농도비(A1B/NCC)	26

3. 고찰	31
1) 대기	31
2) 토양	41
3) 수체	58
4) 저토	61
 VI. 결론	 64
1. 결론	64
2. 연구의 한계와 추후 연구의 필요성	66
 ■ 참고문헌	 68
 <부록 1> 대상 화학물질인 VOCs의 물리화학적 성질 (1)	 71
<부록 2> 대상 화학물질인 VOCs의 물리화학적 성질 (2)	72
<부록 3> 대상 화학물질인 PCDDs/DFs의 물리화학적 성질 (1)	73
<부록 4> 대상 화학물질인 PCDDs/DFs의 물리화학적 성질 (2)	74

<표 차례>

<표 1> KPOP-CC 모형의 프로세스	12
<표 2> 입자상 습식침적비(A1B/NCC)와 기상인자 간 상관계수	40
<표 3> 나대지의 토사 유출비(A1B/NCC)와 기상인자의 상관계수	51
<표 4> 숲토양의 토사 유출비(A1B/NCC)와 기상인자의 상관계수	52
<표 5> 수체 농도비(A1B/NCC)와 기상인자간의 상관관계	60
<표 6> 저토와 토양의 농도(A1B) 및 농도비(A1B/NCC) 간 상관계수	63

<그림 차례>

<그림 1> 화학물질의 물성 영역	3
<그림 2> 모형의 공간적 범위 및 분할	8
<그림 3> 연구의 흐름도	15
<그림 4> 서울지역의 월평균풍속 및 연평균풍속(2000~2050년) (단위: m/s)	19
<그림 5> 서울지역 월평균기온 및 연평균기온(2000~2050년) (단위: °C)	20
<그림 6> 서울지역 월평균 총강수량 및 연강수량(2000~2050년) (단위: mm)	21
<그림 7> 서울지역 등급별 평균 총강수빈도 및 연 총강수빈도	22
<그림 8> Benzene 매질 농도의 연평균 변화 (단위: mol/m^3)	24
<그림 9> 1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF 매질 농도의 연평균 변화 (단위: mol/m^3)	25
<그림 10> 모형 실행 기간 중 기후변화로 인한 월평균의 마지막 10년 동안의 대기 농도비(A1B/NCC)	27
<그림 11> 모형 실행 기간 중 기후변화로 인한 월평균의 마지막 10년 동안의 토양 농도비(A1B/NCC)	29
<그림 12> 모형 실행 기간 중 기후변화로 인한 월평균의 마지막 10년 동안의 수체 및 저토의 농도비(A1B/NCC)	30
<그림 13> 대기에서 일어나는 프로세스들의 총 플럭스량 (단위: mol)	33
<그림 14> 모형 실행 기간 동안의 총유입량으로 정규화한 대기 손실프로세스 기여 율의 기후변화전후 차이(A1B-NCC) (단위: %)	33
<그림 15> 대기 중 VOCs의 주요 손실프로세스의 속도 상수 비교 (단위: 1/hour)	36
<그림 16> 대기 중 PCDDs/DFs의 주요 손실프로세스의 속도 상수 비교 (단위: 1/hour)	37

<그림 17> 대기 중 PCDDs/DFs의 입자상 흡착침적비와 입자상 분율(온도 15℃)과의 상관관계	39
<그림 18> A1B 시나리오에 따른 토양의 모형 실행 기간 동안의 단위면적당 총 유입량 (단위: mol/m^2)	42
<그림 19> 기후변화로 인한 단위면적당 유입프로세스의 차이(A1B-NCC) (단위: %)	43
<그림 20> 나대지에서 오염물의 손실프로세스의 총 제거 속도 상수 (단위: 1/hour)	45
<그림 21> 모형 실행 기간 동안의 총유입량으로 정규화한 토양 손실프로세스 기여율의 기후변화전후 차이(A1B-NCC) (단위: %)	47
<그림 22> 토양 중 VOCs와 PCDDs/DFs의 주요 손실 프로세스의 속도 상수 비교 (단위: 1/hour)	48
<그림 23> 대상 화학물질에 따른 K_{msa} , K_{msw} , K_{msp} 값	50
<그림 24> 토양 중 토사 유출비와 $LogK_{ow}$ 와의 상관관계	53
<그림 25> 모형 실행 기간 동안의 농경지의 총플럭스 누적값의 차이(A1B-NCC) (단위: mol)	55
<그림 26> 토양 깊이 (단위: cm)	56
<그림 27-(a)> 기후변화로 인한 수체의 유입프로세스 차이(A1B-NCC) (단위: mol)	59
<그림 27-(b)> 모형 실행 기간 동안의 총유입량으로 정규화한 수체 손실프로세스 기여율의 기후변화전후 차이(A1B-NCC) (단위: %)	59
<그림 28-(a)> 기후변화로 인한 저토의 유입프로세스 차이(A1B-NCC) (단위: mol)	62
<그림 28-(b)> 모형 실행 기간 동안의 총유입량으로 정규화한 저토 손실프로세스 기여율의 기후변화전후 차이(A1B-NCC) (단위: %)	62

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

기후변화에 관한 정부간협의체(International Panel on Climate Change, IPCC) 4차 보고서에 따르면 기후계의 온난화는 확실하다고 밝히고 있다(IPCC, 2007). 기후 변화는 화학물질의 환경 중 동태에 직간접적으로 영향을 미치는데 그 중에서도 온도의 변화는 풍속과 풍향, 강수의 양과 패턴, 습도 등 기상인자를 변화시키고 화학물질 동태에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Lamon et al., 2009). 기후와 기상인자의 변화로 인하여 환경매질의 토양유기탄소, 플랑크톤, 토지이용도, 식생의 종류와 분포 범위, 농경패턴 등의 환경 변화가 발생하며 이러한 변화 역시 화학물질의 환경 중 동태에 영향을 줌으로써 농도 및 매체간의 분포에 영향을 준다(Macleod et al., 2007). 따라서 이러한 화학물질의 환경 중 동태의 변화는 사람과 생태계에 대한 노출의 변화를 가져올 것이다. 또한 기후변화는 사람과 생태계 등 수용체에 대한 독성도 변화시킬 수 있으므로(Macdonald et al., 2005) 기후변화에 따른 화학물질의 노출과 독성의 변화는 결국 사람과 생태계에 대한 위해성이 달라질 수 있음을 의미한다.

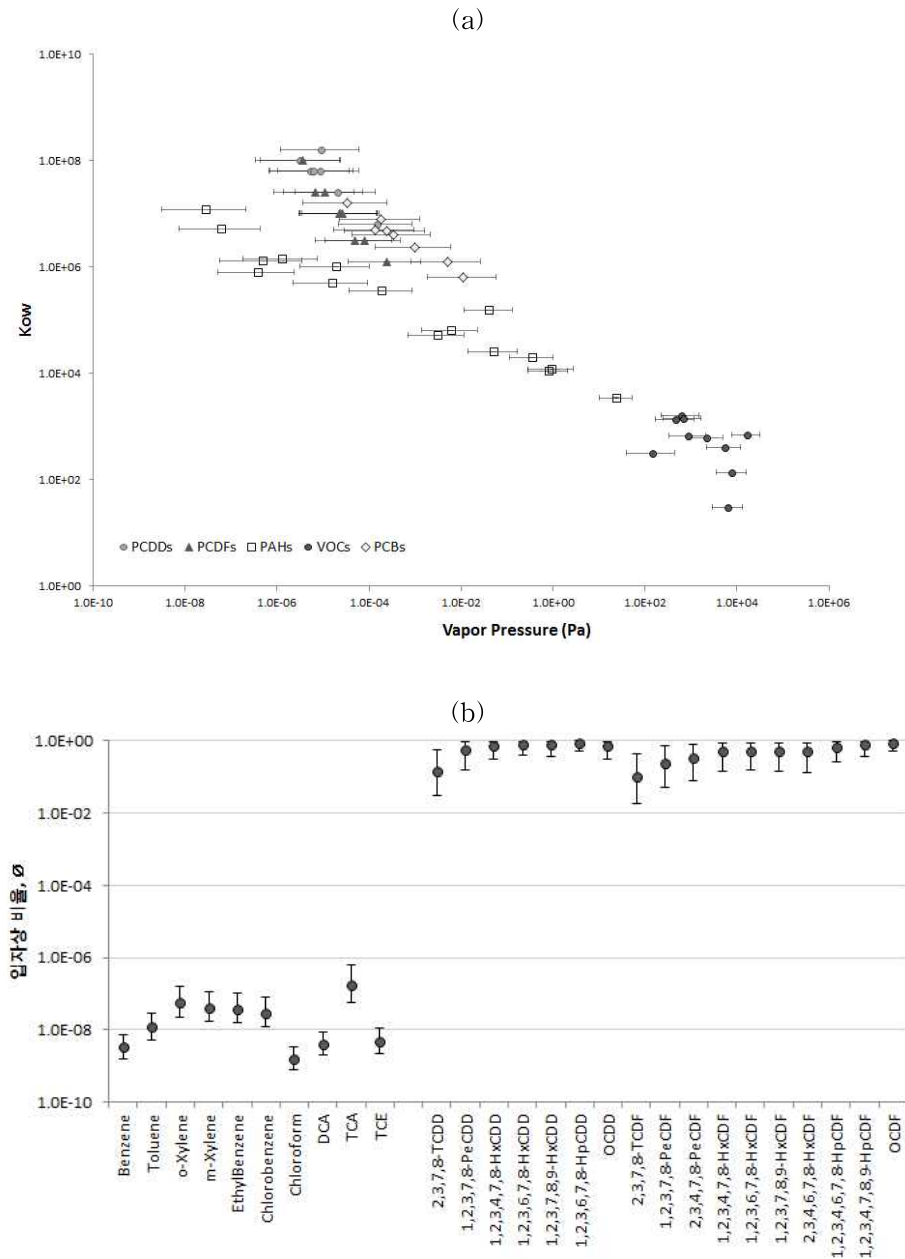
국내에서 기후변화를 고려한 화학물질의 환경 중 동태 변화에 대한 연구는 Benzo[a]Pyrene을 대상으로 다매체 동태 평가를 통하여 이루어진 것이 거의 유일하다(김선아, 2011). 따라서 화학물질의 특성에 따라 환경 중 동태의 양상이 다르게 나타남을 고려할 때, 나아가 여러 다른 화학물질들을 대상으로 확장하여 연구하는 것은 기후변화로 인한 여러 다양한 물리화학적 성질을 가진 화학물질의 환경 중 동태를 이해하고 위해성 변화에 대응하기 위한 중요한 과정이 될 것이다.

다음은 여러 유해화학물질(Legacy hazardous chemicals)의 물성영역(Chemical domain)을 <그림 1>에 나타내었다. <그림 1-(a)>와 같이 왼쪽 위에 위치한 다이옥신(polychlorinated dibenzodioxins, 이하 PCDDs)과 퓨란계 화합물(polychlorinated dibenzofurans, 이하 PCDFs)의 경우 상대적으로 낮은 증기압과 높은 옥탄올-물 분

배계수(이하 K_{ow}) 값을 가지고 있고, 오른쪽 밑에 위치한 휘발성유기화합물(Volatile Organic Pollutants, 이하 VOCs)의 경우 높은 증기압과 상대적으로 낮은 K_{ow} 값을 가지고 있다. 이러한 물리화학적 특징으로 인해 다이옥신류화합물(polychlorinated dibenzo-p-dioxins and furans, 이하 PCDDs/DFs)은 주로 입자상으로 매질 간 이동을 하게 되며 VOCs는 주로 가스상으로 매질 간 이동을 하거나 환경 내에서 제거 과정을 거치게 됨을 알 수 있다. 또한 온도가 증가할수록 증기압이 높아지는데, <그림 1-(b)>와 같이 증기압이 높아지면 입자상 비율은 감소하게 된다. 따라서 기후변화로 인해 기온이 증가하면 증기압의 증가로 대기 중 입자상 비율이 감소할 것으로 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존에 관심을 받아왔던 유해화학물질 물성의 거의 모든 범위를 포괄할 수 있도록 양쪽에서 서로 뚜렷하게 물리화학적 특징이 구분되고 있는 PCDDs 및 PCDFs 중 2,3,7,8위치에 염소를 가지고 있는 동족체인 PCDDs/DFs 17종과 VOCs 10종을 대상 화학물질로 선정하였다.

따라서 본 연구에서는 서로 뚜렷하게 다른 물리화학적 특성을 가진 VOCs¹⁾와 PCDDs/DFs를 대상으로 기후변화 영향에 따라 나타나는 환경 중 동태 차이를 모형을 통하여 비교 평가하고자 한다.

1) 휘발성유기화합물인 VOCs와 반휘발성인 PCDDs/DFs를 나누는 기준은 상온의 증기압을 기준으로 $10E^{-2}$ kPa 이상이 휘발성(volatile), $10E^{-2} \sim 10E^{-8}$ kPa에서 반휘발성(semi-volatile), $10E^{-8}$ kPa 이하에서 비휘발성(non-volatile)으로 구분한다.



<그림 1> 화학물질의 물성 영역(Chemical domain) (a) 증기압 (단위: Pa)과 옥탄올-물 분배계수 (표식: 15℃, 오차막대: 0℃(왼쪽)/30℃(오른쪽)) (b) 온도에 따른 입자상 비율 (표식: 15℃, 오차막대: 0℃(위쪽)/30℃(아래쪽))

II. 기존연구의 고찰

1. 기후변화가 POPs 및 VOCs 동태에 미치는 영향 연구

기후변화로 인한 환경 조건의 변화는 화학물질의 환경 중 동태에 상당한 영향을 끼친다(Lamon et al., 2009). 기후변화로 인한 기온 상승은 일차적으로 대기 및 해양 온도 변화, 해수면 상승, 기상 극값(extreme event), 강수 및 바람 패턴 변화, 대기 중 수증기량 변화, 해수 염도 변화 등을 발생시킨다. 이러한 변화는 이차적으로 잔류성유기오염물질(Persistent Organic Pollutants, 이하 POPs)의 환경 내 동태 및 분포 기작에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 이는 배출원 배출속도의 시공간적 변화, 대기 중 반응속도(reaction rates), 대기와 지표간의 교환 등에 영향을 미친다(Halsall et al., 1999). 또한 분해(degradation)의 경우 10℃가 증가할 경우 반응 속도가 2~3배 빨라진다고 연구되었다(Lammel et al., 2001; Macdonald et al., 2005).

기온 변화는 해양 쪽 대기보다 대륙 쪽 지표 대기에서 빠른 속도로 증가되어 오염물질의 전 지구적 순환 및 분포에 영향을 미치게 된다. 또한 기온 상승으로 토양에서 VOCs의 유출이 증가되며, 기체상과 입자상의 분배, 히드록시라디칼 생성 과정 등이 영향을 받기도 하고(Bloomsfield et al., 2006; Eckhardt et al., 2007) VOCs에 의하여 생성된 유기 에어로졸(organic aerosol)이나 광화학반응이 기후에 영향을 미치기도 한다(D. Ehhalt et al., 2001). 이와 더불어, 기온 상승은 해수면의 기압 변화를 유도하여 고기압권 및 저기압권 형성 과정에 영향을 미쳐서 바람 패턴이 변화하는데 이로 인하여 전 지구적 규모와 국지규모의 POPs 순환이 영향을 받는다(Ma et al., 2004; Caly and Wania, 2005;

MacDonald et al., 2005).

또한 계절성 강우 일수와 강도의 변화는 POPs의 분해산물 및 습식 침적의 분포를 변화 시킨다(Breivik et al., 2006). 해빙의 용해와 증발 속도의 증가는 해양 염도에 영향을 미쳐 염도가 증가할 경우, POPs의 용해도는 감소하게 되어 해양에 저장되어 있던 오염물이 대기로 재 방출된다(Schwarzenbach et al., 2003). 그 외에도 폭풍 해일 빈도의 증가는 토양에 머물던 화학물질을 지표수를 통해 수체로 흘러 들어가게 한다(Dalla Valle M., 2007). 또한 풍향, 풍속의 변화는 대기의 이류와 난류 확산에 크게 영향을 미치므로 대기 중 화학물질의 이동 속도와 방향을 변화시킨다.

2. 다매체 모형 연구

1) 국내외 다매체모형 연구

다매체 모형(Multimedia fate models)은 환경 중에서 매질 내부뿐만 아니라 매질간의 화학물질 동태를 정량적으로 이해하고 이를 통해 화학물질의 환경 중 노출을 평가하는데 효과적으로 사용될 수 있다. 예를 들어 POPs의 경우 높은 잔류성과 생물 농축성, 인체 위해성을 가지고 있는 장거리 이동 물질이기 때문에 환경 중에 배출되면 배출원에 상관없이 여러 다른 매질에 걸쳐 분포하게 된다. 매질간의 여러 복잡한 과정을 통해 매질 간 이동하는 POPs의 경우 단일 매질만을 고려하는 것은 그 동태를 이해하기 어려운 한계를 가지고 있다.

기존에 국내에서 개발·활용되고 있는 다매체 모형에는 남한을 대상 지역으로 하여 비정상상태 시뮬레이션이 가능한 모형인 KoEFT-PBTs (Korean Environmental Fate and Transport of Persistent Bioaccumulative and Toxic substances; Lee, 2005)가 있다. 이를 기반

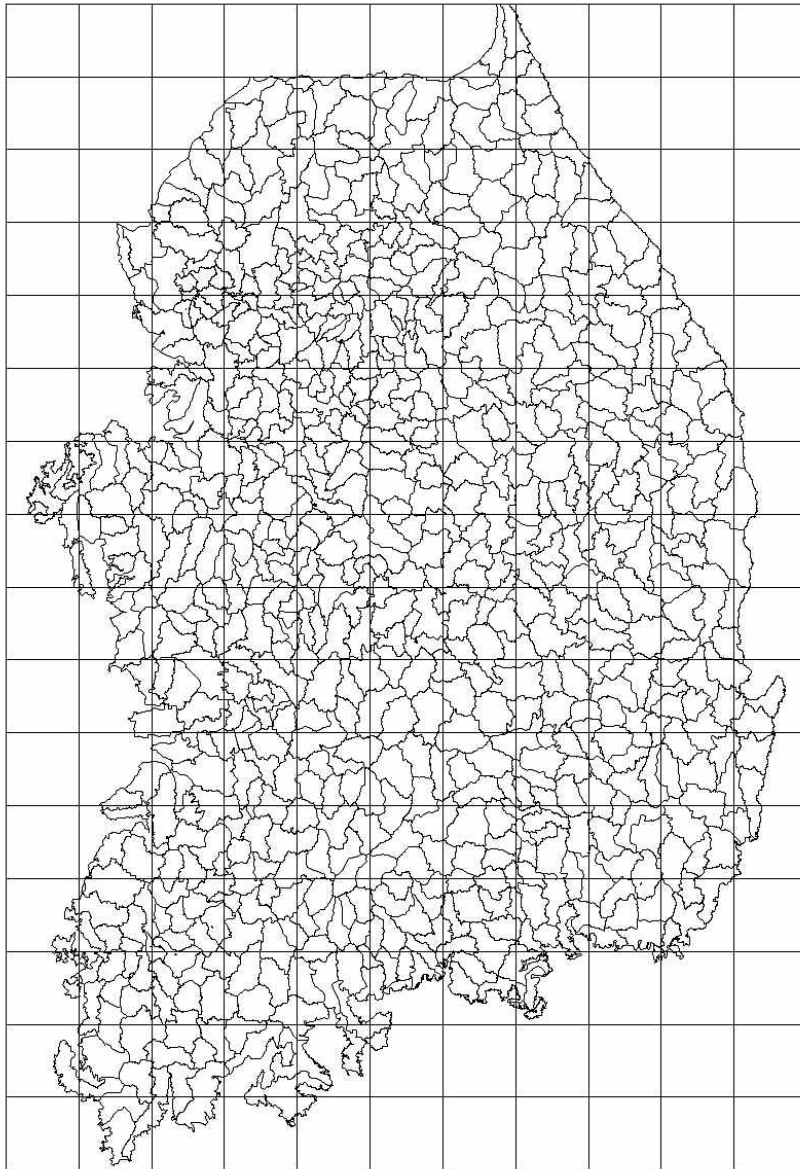
으로 김선아(2011)는 국내에서 유일하게 기후변화로 인한 화학물질의 환경 중 동태를 예측 및 평가하기 위해 수정 구축된 다매체 모형을 이용하여 Benzo[a]Pyrene에 관한 국가규모의 다매체 동태를 평가하였다.

국외의 경우 다매체 모형을 이용한 사례로는 유해화학물질의 사람이나 환경에 대한 예비적 수준의 정량적 위해성 평가를 뒷받침하기 위해 고안된 EUSES (European Union System for the Evaluation of Substances)안에서 사용하는 SimpleBox 및 SimpleTreat 등이 있다(EC, 2004). 또한 기후변화가 POPs의 환경 중 거동에 미치는 영향에 관한 연구는 아직까지 기후변화에 대한 높은 관심에 비해 널리 진행되어 있지 않고 특정 지역에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 북극 지역에 대하여 기후변화가 POPs의 환경 중 거동에 미치는 연구가 집중되었고 (Macdonald et al., 2003, 2005) 그 외의 다른 연구들에서 Berkeley Trent Global Model (BETR-Global)은 온도, 대기 안정도, 광화학반응으로 생성된 히드록시라디칼의 농도가 다른 환경 조건아래 대기 중 PCB (polychlorinated biphenyls)의 농도 패턴을 설명한 바 있으며(Macleod et al., 2007) 이탈리아 라군(Lagoon) 지역을 대상으로 장기적인 관점으로 다매체 모형을 이용하여 50년 후 PCB와 PCDDs/DFs의 분포와 이동량에 미치는 영향에 관한 연구(Dalla Valle M., 2007) 등 특정 지역에 관한 연구들이 진행되어 왔다.

따라서 국내외에서 다매체 모형을 이용하여 기후변화로 인한 화학물질의 동태에 대한 연구는 아직 초기 단계이다. 환경 중에서 화학물질은 매질 내부뿐만 아니라 매질 간 이동을 하며 기후변화로 인하여 화학물질의 물리화학적 특성에 따라 환경 중 동태가 변화될 것이므로 이를 정량적으로 살펴보기 위한 적절한 모형이 필요할 것이다. 따라서 본 연구 대상 화학물질인 POPs와 VOCs의 환경 중 동태를 이해하기 위한 효과적인 수단으로 다매체 모형을 사용하고자 한다.

Ⅲ. 모형 연구

KPOP-CC (Persistent Organic Pollutants under Climate Change Conditions in Korea, 이하 KPOP-CC; 이동수 외, 2012) 다매체 모형은 남한 지역의 공간 범위에서 반휘발성 물질의 다매체 환경거동을 분석하기 위하여 개발된 KoEFT-PBTs (이윤아, 2005)를 발단으로 하였다. KPOP-CC 모형은 남한지역을 포함하는 북위 34°~39°, 동경 125°50' ~ 130°의 지역에 대하여 토지피복도, 유역도, 토질도 및 수치표고자료를 통해 706개의 하천 및 유역(~1000km² 범위 이내) 으로 구분하여 176개의 대기 격자(30km x 30km) 와 연결하였다(<그림 2> 참조). 본 연구를 위해 여기에서는 모형의 간단한 물질수지방정식과 모형에 반영되어 수정된 내용을 중심으로 정리하였다(<표 1> 참조).



<그림 2> 모형의 공간적 범위 및 분할 (이윤아, 2005). KPOP-CC 모형은 북위 34°~39°, 동경 125°50'~130°의 지역을 대상으로 하며, 176개의 대기 격자 (30km x 30km) 와 703개의 하천 및 유역으로 지표가 구분되어 연결되어 있다.

1. 물질수지방정식

다음은 KPOP-CC 모형에서의 물질수지방정식을 나타낸 것이다. 시스템 전체의 오염물질의 변화량은 각 매질(i-th compartment)에서의 시간에 따른 물질변화량의 합으로 나타내어진다. 아래첨자 i는 대기, 수체, 토양, 식생, 저토 등 각각의 매질을 나타낸다. 다음은 각각의 매질내의 물질수지식을 나타낸다.

$$V_{sys} \frac{dC_{sys}}{dt} = \frac{dM_{sys}}{dt} = \sum \frac{dM_i}{dt} \quad \dots(3.1)$$

V_{sys} : 시스템 전체의 부피(m^3)

C_{sys} : 시스템 내의 오염물질의 몰농도 (mol/m^3)

M_{sys} : 시스템 내의 오염물질의 몰수(mol)

각 매질 내에서 오염물질의 변화량은 오염물질의 유입률(input rate)에서 유출률(output rate)을 뺀 값으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dM_i}{dt} = E_i + S_i + \sum_j (T_{j,i} - T_{i,j}) + (F_{inp} - F_{out}) \quad \dots(3.2)$$

E_i : 해당 매질로의 오염물질의 직접 배출

S_i : 매질 내에서 오염물질의 반응생성

F_{inp} : 인접 지역으로부터의 대기 및 물의 이류를 통한 유입

$T_{j,i}$: j-th 매질로부터의 매질 간 유입

F_{out} : 이류에 의한 유출

$T_{i,j}$: j-th 매질로의 매질 간 유출

R_i : 분해에 의한 제거

2. 매질별 주요 반영 모듈

1) 대기

대기 중 오염물질은 가스상과 입자상으로 분배되는데 이를 결정하는 요인 중에는 증기압, 환경적 요인, 온도 등이 있다. 이러한 가스상-입자상 분배를 대상 화학물질별로 모형에 반영하도록 하였으며 이 때, 온도에 따른 증기압의 변화도 반영하였다. 또한 대기 중 대부분 가스상으로 존재하는 VOCs와 같이 가스상 오염물질은 강우에 의하여 대기에서 지표로 가스상 습식침적(wet gas deposition)에 의하여 이동하게 되므로 헨리 상수 (Henry's law constant)와 연관이 깊다. 따라서 온도와 물성에 따른 헨리상수를 모형에 반영하도록 하였다.

대기 중 유기오염물의 분해과정은 빛에 의한 직접 분해와 오존, 질소산화물, 히드록시라디칼 등의 광산화제에 의한 분해이다. 그러나 대부분의 POPs의 경우 대기 중 가스상과 히드록시라디칼의 반응이 대부분을 차지하며 기후변화로 인한 기온 상승으로 인해 히드록시라디칼의 농도가 달라질 것이 예상되므로, 히드록시라디칼 농도를 온도함수로 보완하여 PCDDs/DFs 및 휘발성 유기화합물의 광분해 반응에 사용하였다. 또한 휘발성 화합물은 PCDDs/DFs와 같은 반휘발성 물질과는 달리 대기 중에서 입자상으로 분배될 경우 대기 습도에 의해 영향을 받으므로 본 연구에서는 이를 위한 특성이 모형에 반영되도록 하였다.

기후변화에 의해 대기의 유통속도가 달라지므로 이를 모사하기 위해 혼합고와 수평 및 수직 난류확산을 태양단파복사, 기온 및 풍속의 함수로 도입하였다.

2) 토양

토지 피복은 바다, 수역, 나대지, 초지, 숲토양 및 농경지로 구분하

였다. 구획된 각각의 유역에 대하여 경사도, 경사길이 및 토양특성을 산출하였으며, 이 자료를 토대로 강수 유출 및 토사 유출과정을 모사하였다. 강수 유출에 있어서 기후변화로 나타나는 강수패턴의 변화, 증발량의 변화 등을 반영할 수 있도록 SCS curve number method²⁾를 도입하여 강수 유출에 의한 토양에서 수체로의 오염물 이동을 모사하였다. 또한 기존의 모형이 중규모 혹은 소규모 유역에 대하여 동일한 토사 유출량을 적용하였으나, KPOP-CC모형에서는 지표분할 시 추출된 경사도, 경사길이 및 토양 특성등을 각 유역의 입력 자료로 활용하여 기후변화에 의해 발생하는 강수세기 및 지속기간의 변화 등에 따라 유역이 반응하도록 하여, 집중강우 등에 의한 토사 유출 등 기상극값(extreme event)을 모사할 수 있도록 하였다.

토양 내 분배에서 유기오염물을 기존의 모형에서는 가스상, 용존상 및 토양입자의 유기탄소에의 흡수상 세가지로 구분하였으나, 용존상 유기탄소에의 흡수상을 고려하여 토양 내 총 농도는 입자상, 가스상, 용존상 및 용존유기탄소 흡수상 농도로 표현하였고, 토양 입자 흡수상의 수직이동을 반영하기 위해, 유효확산계수(effective diffusivity)에 흡수상 확산계수를 도입하였다. 또한 환경 매질 중 토양은 대기나 수체와 같이 완전혼합매질(well-mixed compartment)이 아니고, 토양 내 오염물의 확산 거리는 물질특성에 따라 변하므로, 수정된 Damköhler number로부터 물질별 유효토양깊이를 계산할 수 있도록 하였다.

또한 식생으로 오염물이 분배될 경우, 반휘발성 유기물이 식물체 내의 유기물에 많이 분배되는 경향이 있는 반면 휘발성 유기물은 식생의 유기물보다는 수분함량에 보다 큰 영향을 받으므로 이를 모형에 반영하였고, 식생 부피의 계절 변화를 반영하여 식생으로 흡수되는 대기 가스상 오염물양의 변화를 볼 수 있도록 하였다.

2) NRCS(Natural Resources Conservation Service), <http://soils.usda.gov>

<표 1> KPOP-CC 모형의 프로세스

	Reference
가스상-입자상 분배평형	Goss and Eisenreich, 1997 ³⁾ (VOCs) Finizio, 1998 ⁴⁾ (PCDDs/Fs)
증기압	NIST ⁹⁾ (VOCs) Gusev, 1996 (PCDDs/Fs)
헨리 상수	NIST ⁹⁾ (VOCs) Gusev, 1996 (PCDDs/Fs)
히드록시라디칼 농도	Beyer. et al. 2003 ⁵⁾
대기 중 수평, 수직 난류확산	Pekar et al, 1999 ⁶⁾
강우 유출 속도	Marek, 2009 ⁷⁾
토사 유출 속도	Novotny and Chester, 1981 ⁸⁾
토양 깊이	Cowan et al., 1995 ⁹⁾
생물 농축계수	NIST ¹⁰⁾ (VOCs) Gusev 1996 ¹¹⁾ (PCDDs/Fs)

3) Goss and Eisenreich(1997), Atmospheric environment.

4) Finizio(1998), Atmospheric Environment

5) Beyer, A. et al. ES&T(2003), 766-771.

6) Pekar, M., Pavlova, N., Gusev, A., Shatalov, V., Vulikh, N., Ioannisian, D., Dutchak, S., Berg, T., and Hjellbrekke, A-G.(1999), Long Range transport of selected persistent organic pollutants, EMEP Report 4/99.

7) Mark A. Marek(2009), Hydraulic Design Manual,-Texas Department of Transportation.

8) Novotny, V., Chester, G.(1981), Handbook of nonpoint pollution. Source and management., van Nostran Reinhold company.

9) Cowan C. E., MacKay, D., Feijtel, T. C. J., van de Meent, D., Guardo, A. D., Davies, J., MacKay, N.(1995), The multimedia fate model: A vital tool for predicting the fate of chemical. SETAC Press.

10) NIST Chemistry web-book

11) Gusev(1996), MSCE-POP Model description.

IV. 연구 방법

1. 연구의 방법

본 연구에서는 기후변화에 의한 오염물질의 환경 중 동태의 변화를 추적할 수 있도록 개발된 다매체동태모형인 KPOP-CC 모형을 활용하였다. 기후변화를 반영하기 위하여 기상자료는 IPCC 4차 보고서를 위하여 작성된 SRES A1B시나리오¹²⁾를 사용하며, 이와 함께 2000년 기상예측 자료를 기후변화를 반영하지 않은 기상자료로 실행(No Climate Change, 이하 NCC)하여 함께 비교 분석하였다. 이는 기후변화를 반영한 기상자료가 예측값이므로 기후변화를 반영하지 않은 기상자료 또한 실측값이 아닌 동일하게 모형을 통한 예측값을 사용하여 비교 분석함으로써 일관성 있는 입력값을 사용하고자 하였다.

배출시나리오에 관하여는 환경 중 오염물질의 배출량을 서울지역을 포함하는 격자에서만 대기를 통해 배출($1 \times 10^{-3} \text{ mol/h}$)하도록 하였다. 모형의 배출량은 대상 오염물질의 배출량 정보가 불확실성을 가지고 있기 때문에 현재 배출량과 비슷한 수준에서 고려된 값으로 모든 물질에 대해 동일하게 적용하였으며, 이를 통하여 기상조건과 환경 조건, 배출량 조건이 일정할 때 오염물질의 물성에 따른 환경 동태를 분석·평가하였다.

이러한 입력 자료로 주어진 기후시나리오와 배출량 시나리오를 기반으로 모형을 통해 오염물질의 농도와 매질 간 이동량(Flux, 이하 플럭스)을 산출한다. 이렇게 모의한 결과로 먼저 기후변화 반영 전(NCC) 과 기후변화 반영 후(A1B시나리오, 이하 A1B)의 매질별 절대 농도의 변화를 화학물질에 따라 살펴봄으로써 환경 중 오염물질의 매질에 따른 변화

12) A1B 시나리오는 IPCC가 설정한 온실가스 미래 배출량 시나리오 6개 중 2100년에 이산화탄소 농도가 현재보다 약 2배 높은 720ppm에 도달한다고 가정한 기후시나리오이다.

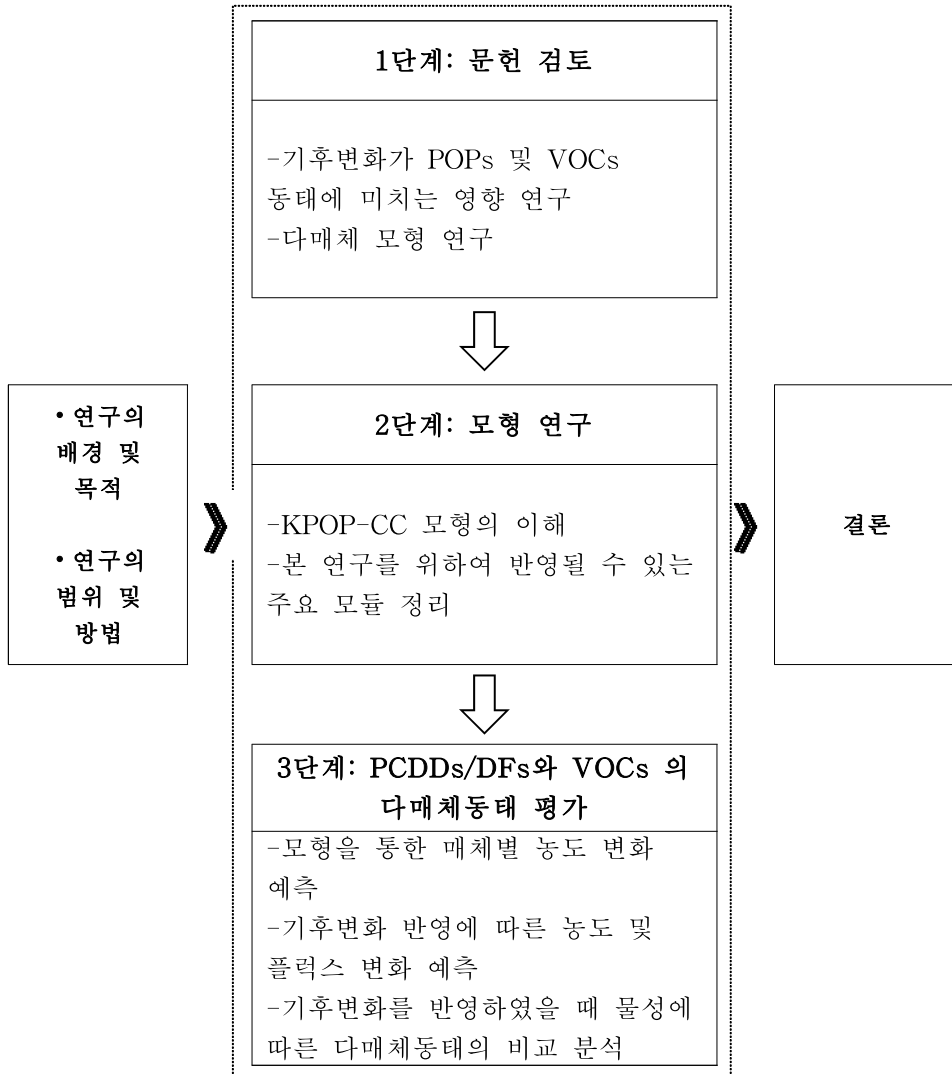
양상과 특징을 파악하고자 하였다.

이러한 오염물질의 환경 중 동태의 전반적인 이해를 바탕으로 기후 변화영향을 고려하기 위해 기후변화 적용 전과 기후변화 적용 후의 농도 비(A1B/NCC)를 살펴보았다. 그리고 이러한 기후변화로 인한 농도 변화의 원인을 분석하기 위하여 오염물질의 매질 간 플럭스의 변화를 분석하였다. 이는 오염물질의 농도는 매질안과 매질 간에 이루어지는 여러 프로세스들의 기작을 통하여 결정되기 때문이다. 이러한 연구의 흐름을 정리하여 <그림 3>에 나타냈다.

따라서 연구 단계는 다음과 같이 구분된다.

첫 번째, 국내외 다양한 기후변화 및 물리화학적 특성에 따른 화학물질의 환경 중 동태에 관한 연구 자료를 검토하고, KPOP-CC 모형의 특징을 파악한 후 기후변화를 반영하여 물리화학적 특성이 다른 대상 화학물질의 동태를 파악하는데 반영한다.

두 번째, 모형을 통해 서로 다른 물리화학적 특성을 가진 VOCs 와 PCDDs/DFs의 기후변화에 따른 매질에서의 농도 변화를 플럭스 분석을 이용하여 비교 평가하여, 다매체 거동에서 화학물질의 물리화학적 특성과 기후변화와의 연관을 이해하고 평가하였다.



<그림 3> 연구의 흐름도

2. 연구의 범위

모형 활용 연구의 공간적 범위는 서울지역을 포함하는 격자이며 시간적 범위는 2000년부터 2050년까지이다. 연구의 대상 화학물질로는 다이옥신 및 퓨란의 2,3,7,8-치환동족체 17종 및 VOCs (Benzene, Toluene, o-Xylene, m-Xylene, Ethylbenzene, Chlorobenzene, Chloroform, 1,2-dichloroethane (이하 DCA), 1,1-dichloroethene (이하 TCA), 1,1,1-trichloroethylene (이하 TCE)) 10종이다. 매질의 범위는 대기, 토양, 수체, 저토이며 토양은 나대지, 농경지, 초지, 숲토양으로 나누어 분석하였다.

V. 결과와 고찰

1. 기후변화시나리오에 따른 기상변화

기상자료는 기상연구소에서 생산한 SRES Markers A1B시나리오를 반영하여 생산된 남한 규모의 기상예측자료(2000~2050년)를 사용하였다. 이는 국립기상연구소에서 전지구기후변화모델 ECHO-G를 도입하여 전지구의 기후변화 시나리오를 생산하고 이를 다시 한반도 지역의 기후변화를 전망하기 위하여 지역기후모델인 MM5¹³⁾를 이용하여 얻어낸 기상자료이다. 본 연구에서 3시간별 자료를 이용하여 분석하였다.

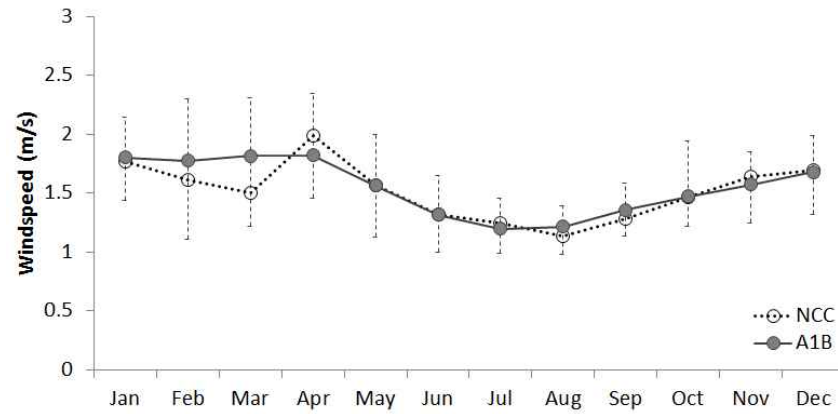
<그림 4>부터 <그림 7>은 A1B시나리오에 의한 서울지역의 2000년부터 2050년까지 풍속, 기온, 강수량, 강수 빈도를 나타내었다. 서울 지역의 50년간 월평균 풍속은 약 1.5m/s 이고 월평균 최대 풍속은 2.4m/s였다. 계절별로 3월에 기후변화 후 풍속의 증가가 두드러졌는데, 평균 풍속에 비해 약 20% 증가한 값이다. 기후변화로 인한 월평균 풍속의 차이는 2월부터 4월이 가장 컸고, 나머지 월평균 풍속은 큰 차이를 나타내지 않았다. 50년간 풍속 값은 증감이 반복되며 첫해에 비해 약 0.05m/s 증가하였다.

서울지역의 50년 전체 월평균 기온은 9.8℃로 월 최저기온 영하 13℃, 월 최고기온 영상 25℃의 범위 내에 있다. 50년 전체 기온은 약 3℃ 이내의 증가를 보인다.

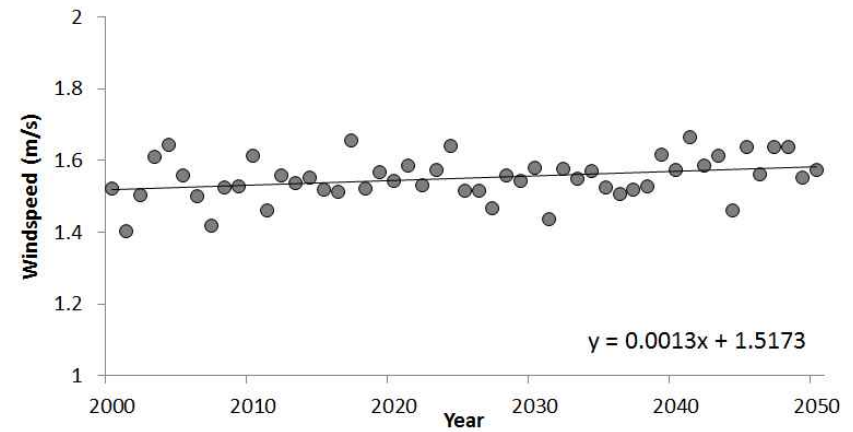
월강수량은 여름과 11월에 기후변화 전후의 차이가 가장 컸으며 50년간 연강수량의 평균값은 약 2212mm/year이다. 50년간 연강수량은

13) MM5 (PSU/NCAR Mesoscale meteorological Model Version3)는 중규모 기상모델로서 미국 기상연구소(National Center for Atmospheric Research)와 펜실베이니아 주립대학이 공동 개발한 후 지속적으로 개선되어 온 모델이다. 현재 기상청에서 사용되고 있다.

1000mm 범위 이상의 변이폭을 가지며 증감하는데 첫째에 비해 약 550 *mm/year*의 증가를 보였다. 우리나라 현재 연강수량이 약 1300mm 이상으로 연강수량의 50%가 6월부터 9월에 집중되는 특징을 가지고 있을 때, <그림 6>은 현재의 강수 패턴 특징과는 차이가 있다. 하지만 본 연구의 목적이 제시된 기상조건에 따른 화학물질의 물성에 따른 환경 중 동태를 분석하는 것이므로 하나의 가능성으로 제시된 기후시나리오 조건에 따른 기상인자의 특징을 중심으로 환경 중 동태를 이해하는 것이 필요하다. 기후변화 후 강수 빈도가 증가하는데 특히 낮은 강수 속도(0.05 ~ 1mm/hour)의 강수 빈도가 증가하는 특징을 보인다.

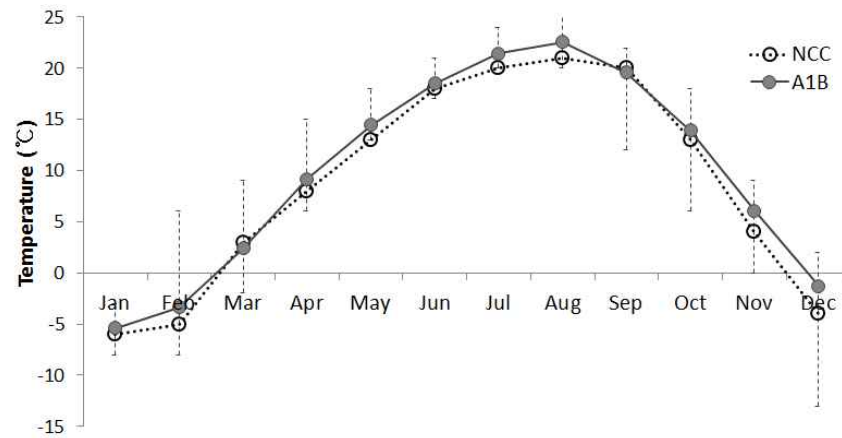


(a)

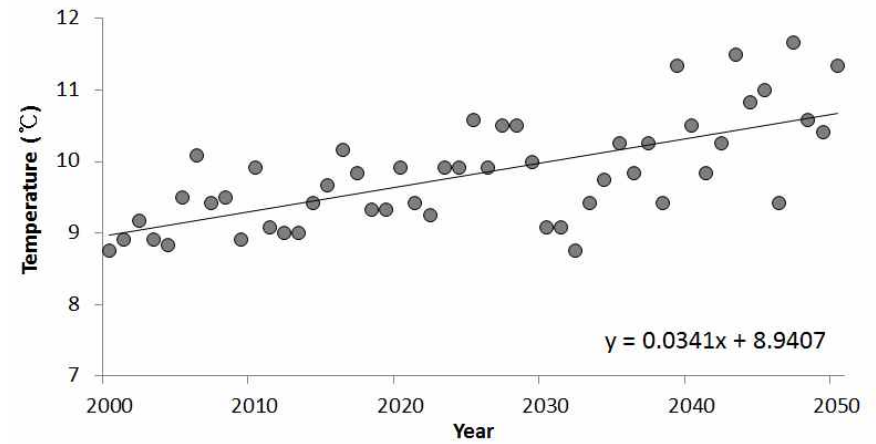


(b)

<그림 4> (a) 서울지역 월평균풍속 ($\cdots\bigcirc\cdots$: 기후변화 없을 때 (NCC), $\text{---}\bullet\text{---}$: 기후변화 있을 때 (A1B), 표식: 산술평균, 오차막대: 최소/최대값) (b) A1B시나리오에 의한 서울지역 연평균풍속 (2000~2050년, 단위: m/s)

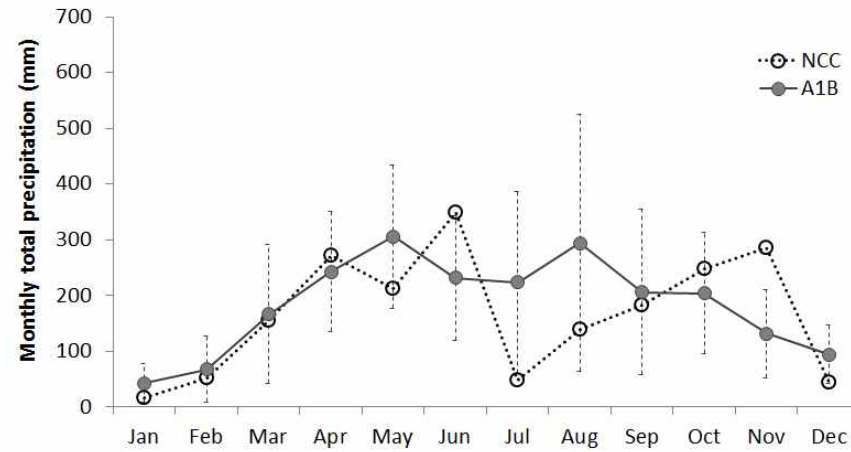


(a)

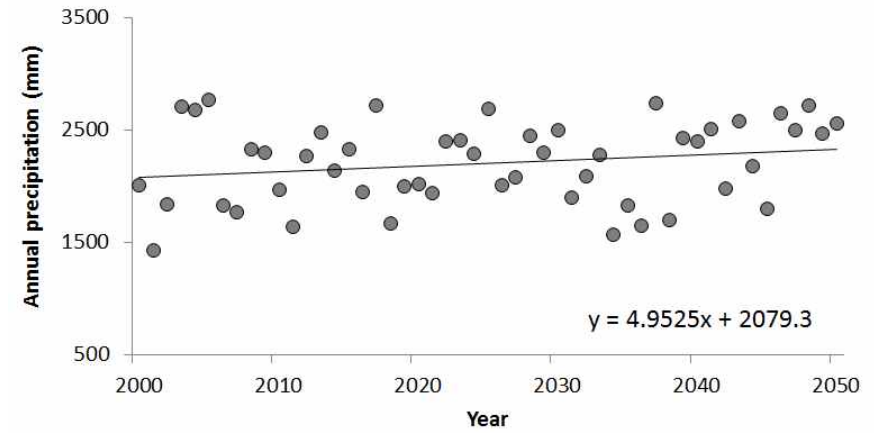


(b)

<그림 5> (a) 서울지역 월평균기온 (\circ : 기후변화 없을 때 (NCC), \bullet : 기후변화 있을 때 (A1B), 표식: 산술평균, 오차막대: 최소/최대값) (b) A1B시나리오에 의한 서울지역 연평균기온 (2000~2050년, 단위: °C)

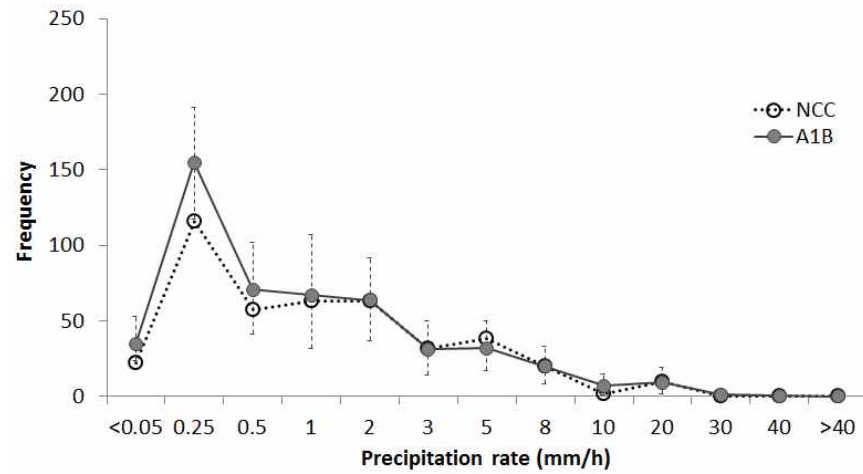


(a)

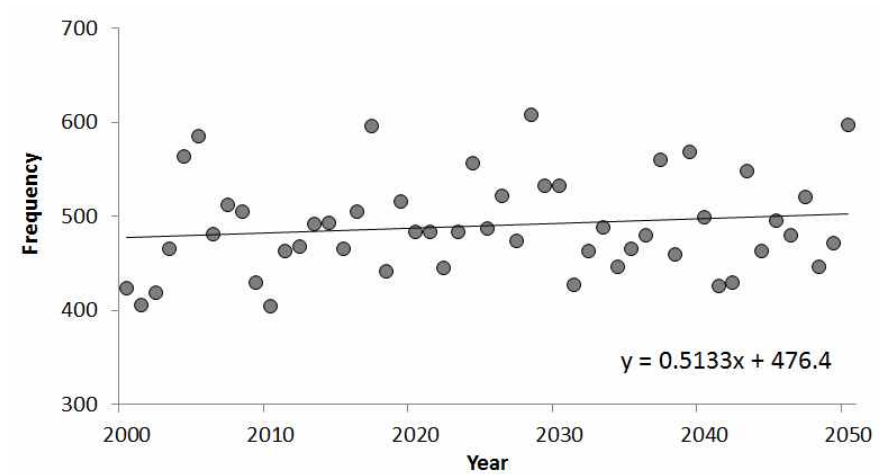


(b)

<그림 6> (a) 서울지역 월평균 총강수량 (\circ : 기후변화 없을 때 (NCC), \bullet : 기후변화 있을 때 (A1B), 표식: 산술평균, 오차 막대: 표준오차) (b) 서울지역 연강수량 (2000~2050년, 단위: mm)



(a)



(b)

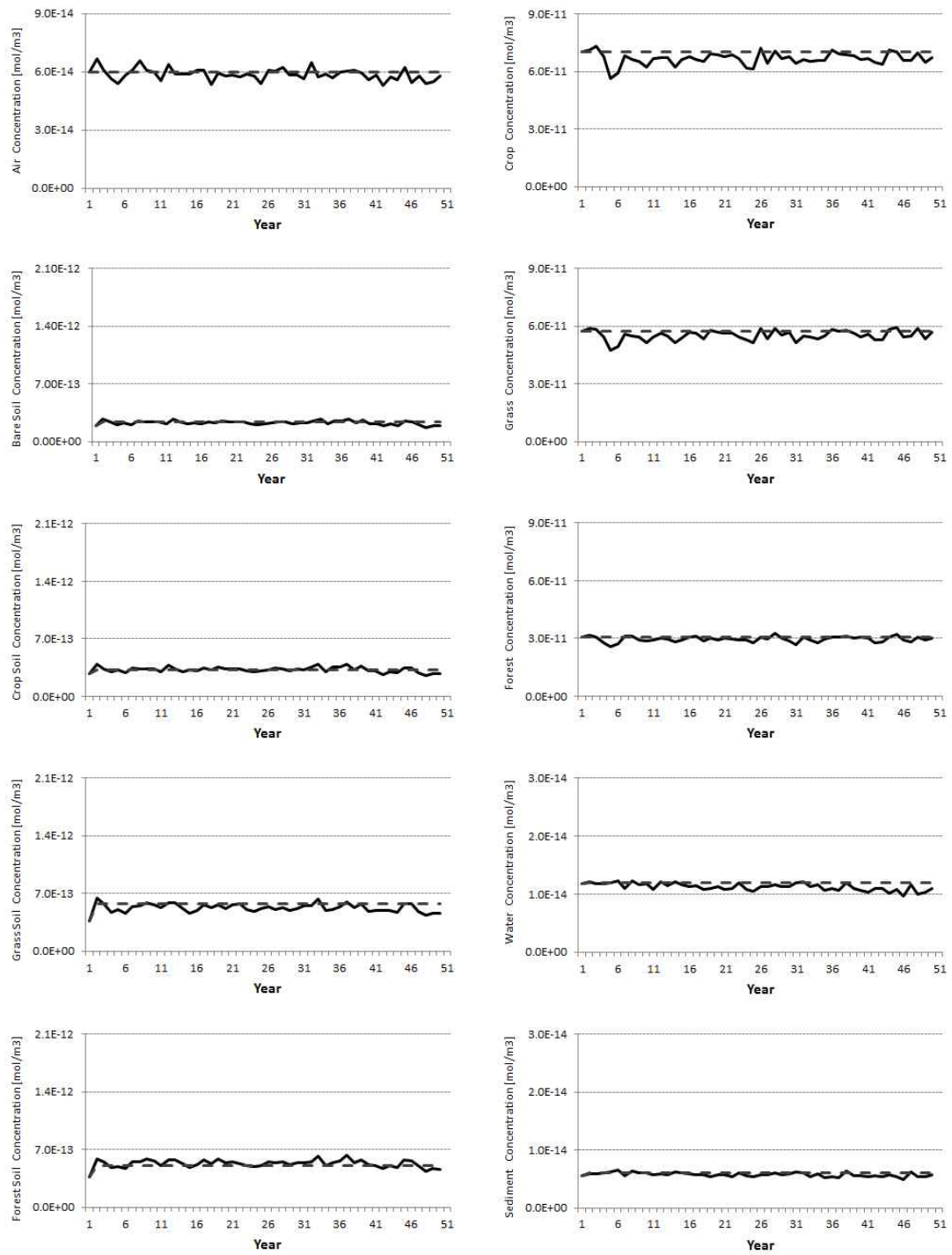
<그림 7> (a) 서울지역 등급별 평균 총강수빈도 (\circ : 기후변화 없을 때 (NCC), \bullet : 기후변화 있을 때 (A1B), 표식: 산술평균, 오차막대: 최소/최대값) (b) 서울지역 연 총강수빈도 (2000~2050년)

2. 예측 결과

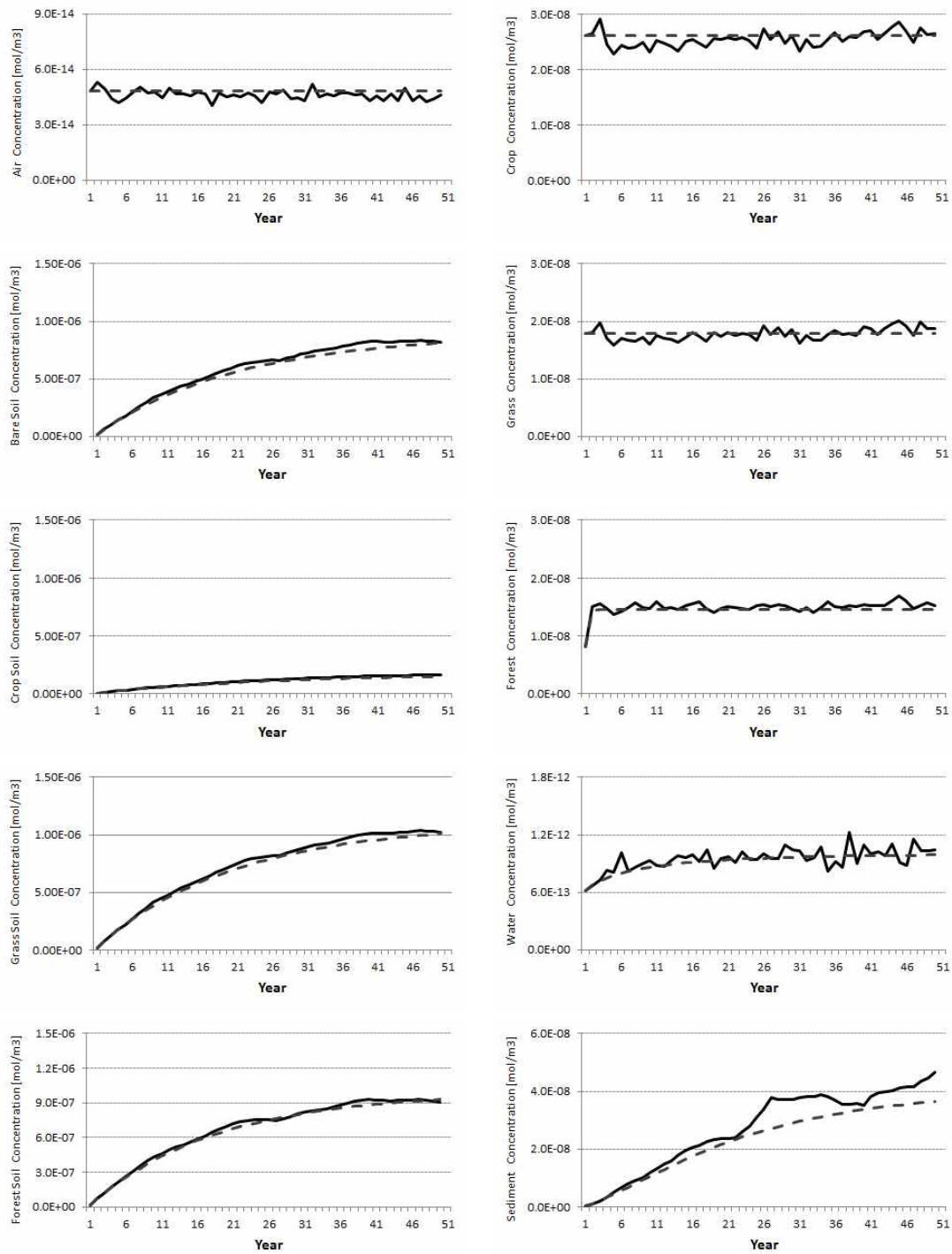
1) 농도

모형 실행 기간 동안의 매질별 연평균 농도 변화를 Benzene, OCDF에 대하여 나타내었다. 본문에서는 매질 농도의 연평균 변화의 경향성을 보이기 위하여 VOCs, PCDDs/DFs 각 그룹의 대표적인 물질에 대한 결과만을 보였다(<그림 8>과 <그림 9> 참조).

구체적인 변화추세는 물질에 따라 다르지만, VOCs의 경우는 모든 매질에서 농도 증가 속도가 빠르게 안정화 되는 경향을 보였다. 반면 PCDDs/DFs의 경우는 대기에서는 VOCs와 같이 빠르게 안정화되지만 토양, 수체 및 저토에서 시간이 지남에 따라 완만하게 계속 증가하는 추세를 보인다. VOCs의 경우 대기를 제외하고 대부분의 매질의 농도가 PCDDs/DFs보다 낮았으며, 특히 수체, 저토의 농도가 낮았다. 반면 PCDDs/DFs는 대기의 농도가 가장 낮고, 토양과 저토의 농도가 가장 높았다.



<그림 8> Benzene 매질 농도의 연평균 변화 (실선:A1B, 점선:NCC, 단위: mol/m^3)



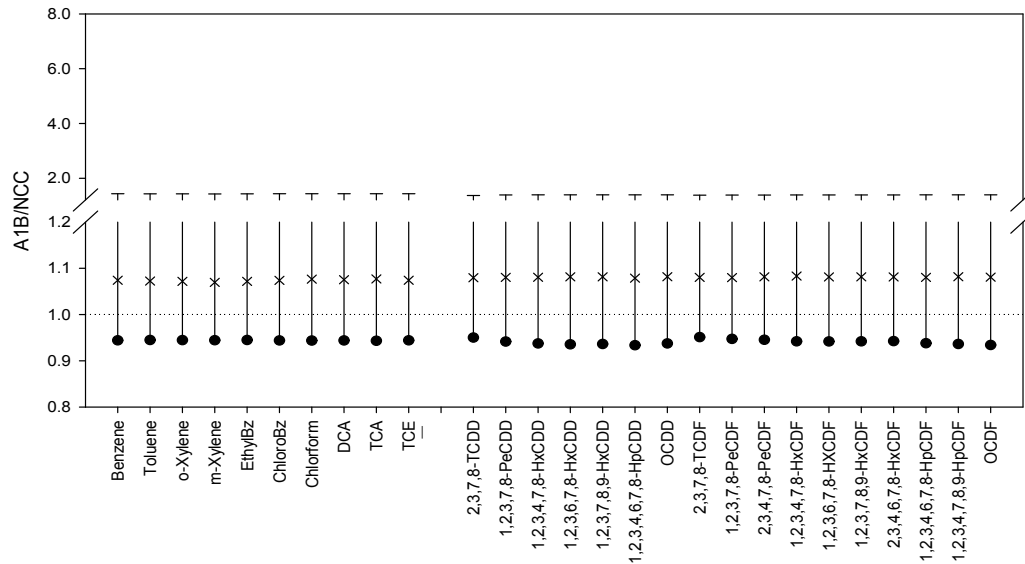
<그림 9> 1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF 매질 농도의 연평균 변화 (실선:A1B, 점선:NCC, 단위: mol/m^3)

2) 기후변화시나리오에 따른 농도비(A1B/NCC)

기후변화로 인한 기상인자의 변화는 50년 이상의 장기간에 걸쳐 발생되며, 기상 모형을 통한 연구들 역시 장기간에 대한 예측값을 제시하고 있다. 또한 PCDDs/DFs의 경우 토양과 저토에서 시뮬레이션 시작 후 30여년 이상이어야 농도의 증가 속도가 둔화되어 준 정상상태(pseudo-steady state)에 도달하게 되므로 이러한 기후변화로 인한 기상인자의 특성과 오염물의 매질 농도 변화 특성을 고려하여, 모형 실행 기간 50년 중 월평균의 마지막 10년 동안의 평균 농도비를 비교하여 분석하였다. 각 매질의 농도비는 기후변화 전 농도에 대한 기후변화 후의 농도의 비(A1B/NCC)에 의한 값이며, 채워진 표식은 신뢰수준 95%에서 기후변화 전후의 평균 농도가 통계적으로 유의하게 차이가 있다는 의미이다(t -test, $p < 0.05$). 1보다 큰 값은 NCC대비 기후변화로 인한 농도의 증가를 나타내며, 1보다 작은 값은 NCC대비 기후변화로 인한 농도의 감소를 의미한다.

기후변화로 인한 대기 평균 농도비는 모든 화학물질에 대해서 0.9이내의 감소를 보인다(<그림 10> 참조). 토양의 경우 VOCs의 평균 농도비는 대체로 감소하는데 DCA의 경우 다른 VOCs에 비해 월평균 최대 농도비가 최대 7배 이상까지 크게 증가하였다. PCDDs/DFs의 경우 토양 평균 농도비가 토지피복에 따라 정도의 차이는 있지만 VOCs에 비해 증가하는 유형을 가지고 있고 월평균 최대 농도비는 VOCs와 달리 평균 농도비와 크게 차이가 나지 않았다(<그림 11> 참조). 수체 및 저토에서는 기후변화로 인한 평균 농도비가 VOCs는 모두 0.9 이내로 감소하는데 반해 PCDDs/DFs는 각각 1.1배, 1.2배로 증가한다. 특히 수체에서 PCDDs/DFs는 월평균 농도비가 최대 6배까지 증가한다(<그림 12> 참조).

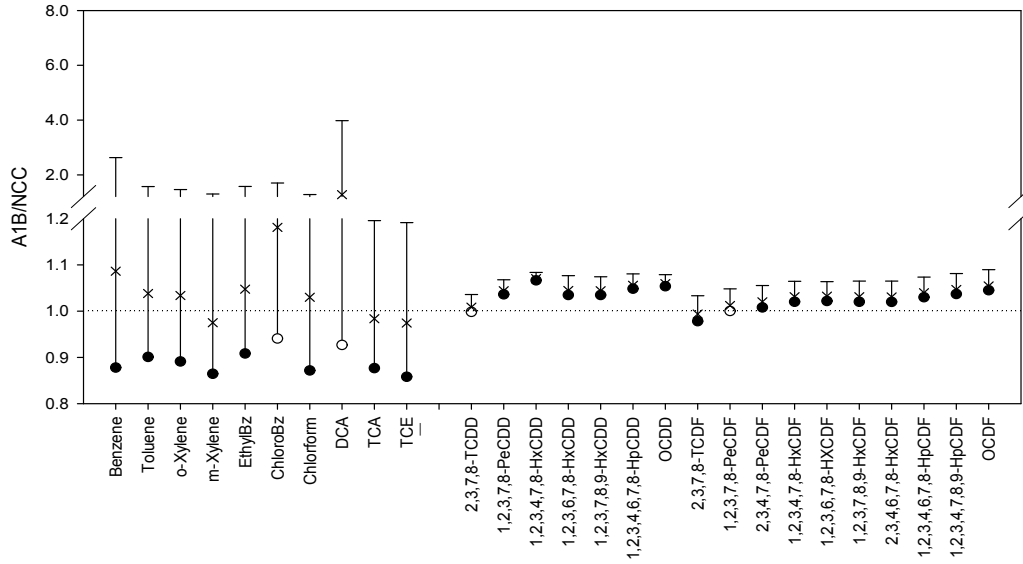
따라서 VOCs는 모든 매질에서 대부분 평균 농도비가 감소유형이 나타나는데 특히 대기에서 물질에 따라 차이가 없이 일정한 감소유형이 나타난다. 반면 PCDDs/DFs는 물질의 염소(Chlorine) 수에 따라 증가하거나 감소하는 대체적으로 일정한 유형의 패턴이 보인다.



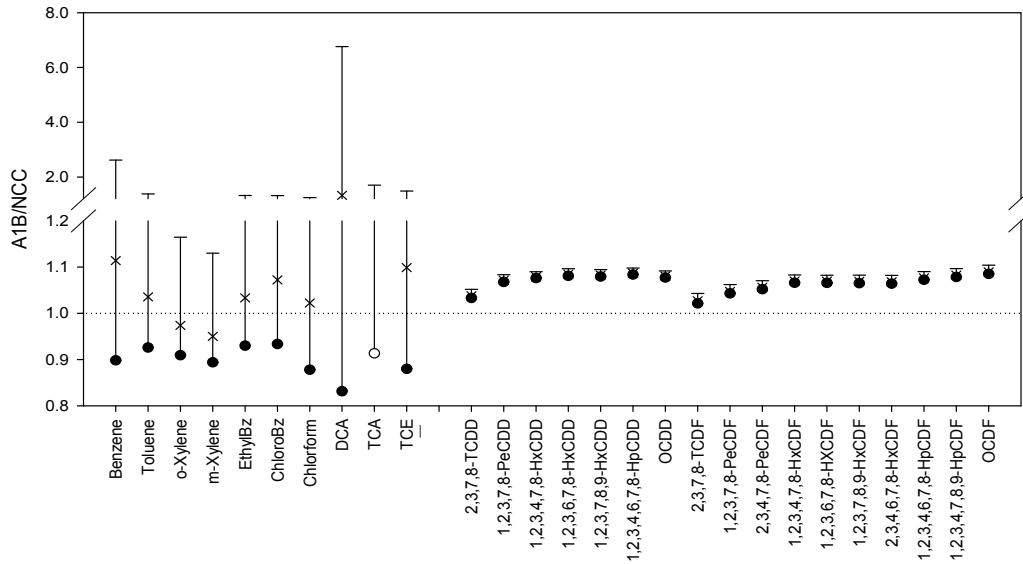
<그림 10> 모형 실행 기간 중 기후변화로 인한 월평균의 마지막 10년 동안의 대기 농도비(A1B/NCC)

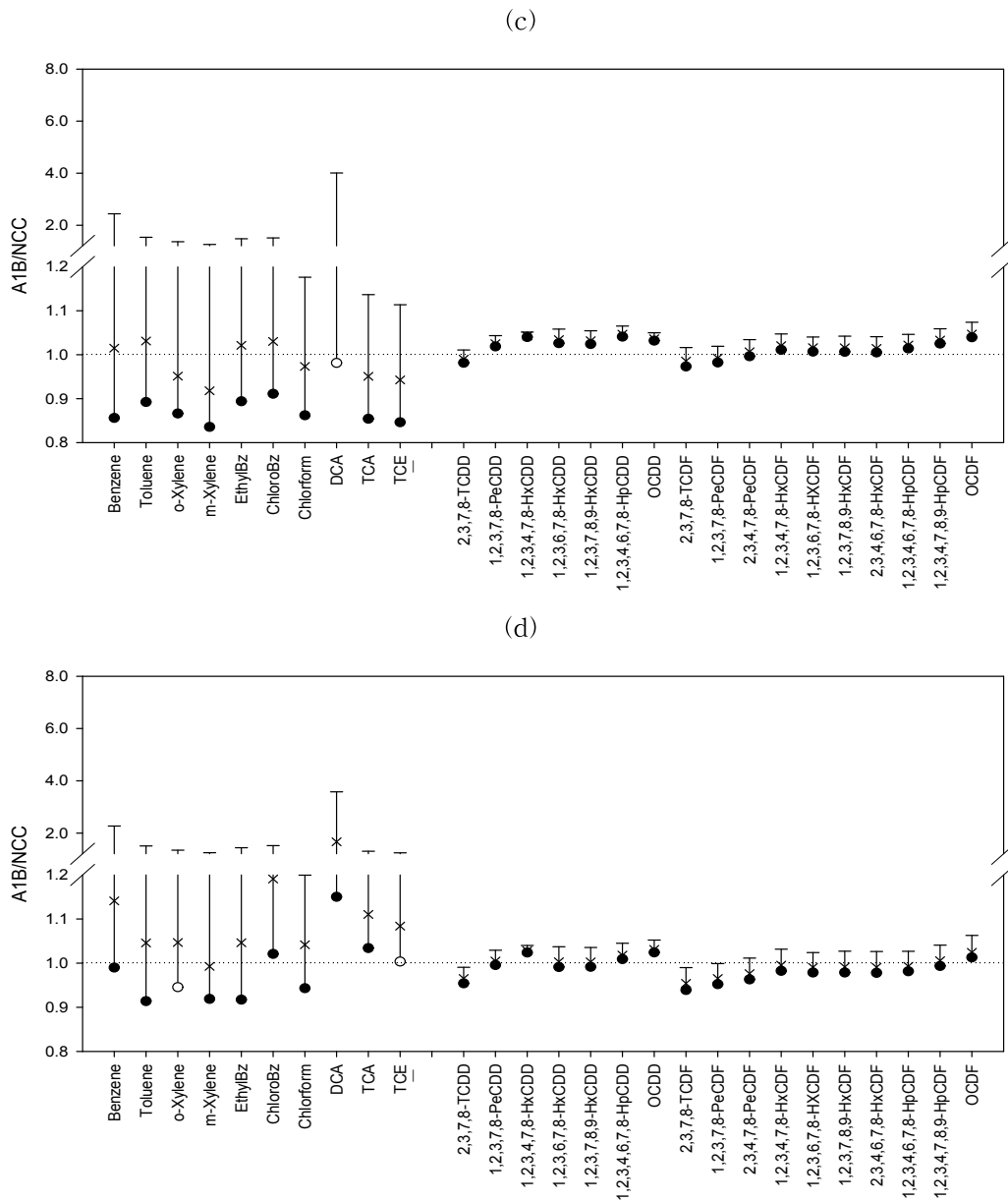
(표식: 기하평균, x : 3사분위수(75%), 오차막대: 최대값, ●: 통계적으로 유의하게 대기 평균 농도의 차이가 있다 ($p < 0.05$), ○: 통계적으로 유의하게 대기 평균 농도의 차이가 없다 ($p > 0.05$))

(a)

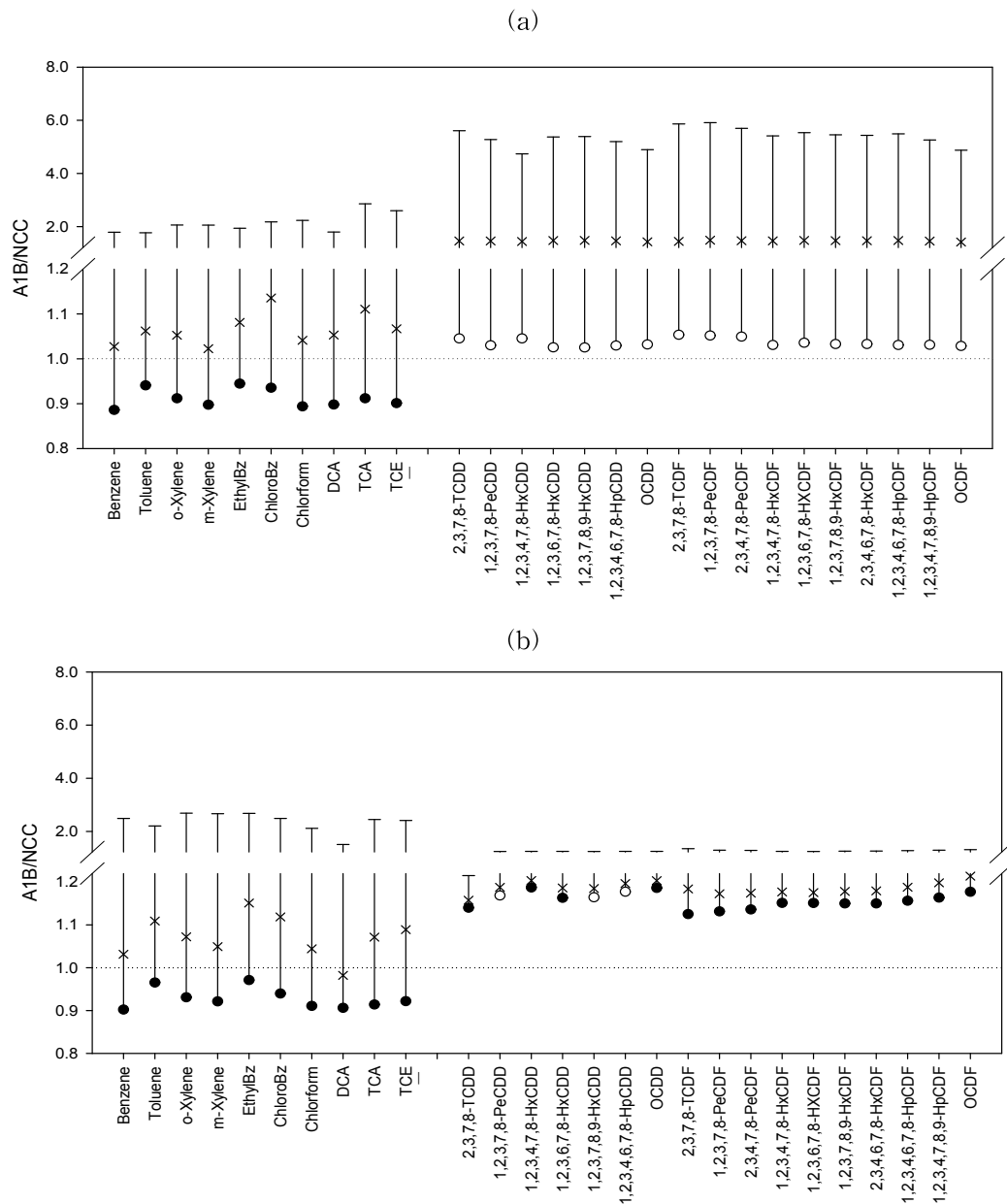


(b)





<그림 11> 모형 실행 기간 중 기후변화로 인한 월평균의 마지막 10년 동안의 토양 농도비(A1B/NCC) (a) 나대지 (b) 농경지 (c) 초지 (d) 숲토양
(표식: 기하평균, x : 3사분위수(75%), 오차막대: 최대값, ●: 통계적으로 유의하게 토양 평균 농도의 차이가 있다 ($p < 0.05$), ○: 통계적으로 유의하게 토양 평균 농도의 차이가 없다 ($p > 0.05$))



<그림 12> 모형 실행 기간 중 기후변화로 인한 월평균의 마지막 10년 동안의 수
체 및 저토의 농도비(A1B/NCC) (a) 수체 (b) 저토

(표식: 기하평균, x : 3사분위수(75%), 오차막대: 최대값, ●: 통계적으로 유의하게
해당 매질 평균 농도의 차이가 있다 ($p < 0.05$), ○: 통계적으로 유의하게 해당 매질
평균 농도의 차이가 없다 ($p > 0.05$))

3. 고찰

1) 대기

대기에서 기후변화 전후의 평균 농도비는 모든 화합물질에서 0.9이내로 감소하며, 신뢰수준 95%에서 월평균의 마지막 10년 동안의 평균 농도 차이가 통계적으로 유의하게 나왔다(<그림 10> 참조).

이러한 대기 농도 변화를 결정짓는 기작으로 대기로의 오염물 유입프로세스를 살펴보면, 지역 배출(emission), 바람에 의한 이류(advection) 및 확산(turbulent diffusion)에 의한 유입, 대기과 접하고 있는 지표로부터의 휘발(volatilization)을 들 수 있고, 손실프로세스는 바람에 의한 이류 및 확산에 의한 제거, 광분해 반응(photodegradation), 입자상 오염물의 건·습식침적(particulate phase dry and wet deposition), 가스상 오염물의 습식침적(gaseous phase wet deposition), 대기하부 지표로의 흡수(absorption)과정이 있다. 이렇게 매질의 유입 및 손실되는 플럭스들의 조합으로 환경 중 매질의 오염물 농도의 변화가 이루어지게 되며, 이 플럭스는 매 시간 각 매질에 존재하는 오염물의 농도와 플럭스 발생 기작의 속도 상수(pseudo first-order rate constant)의 함수로 식(5.1)과 같이 나타난다.

$$\frac{dC_{air}}{dt} = -k_{TRemoval,air} \cdot C_{air} + (k_{vol,s} \cdot C_{soil} + k_{vol,w} \cdot C_{water} + k_{vol,veg} \cdot C_{veg}) \quad \dots(5.1)$$

$$+ AdvectionInFlow + Emission$$

$k_{TRemoval,air}$: 대기 중 총 손실 프로세스의 속도 상수 (1/hour)

$k_{vol,s}$: 토양으로부터 휘발되는 속도 상수 (1/hour)

$k_{vol,w}$: 수체로부터 휘발되는 속도 상수 (1/hour)

$k_{vol,veg}$: 식생으로부터 휘발되는 속도 상수 (1/hour)

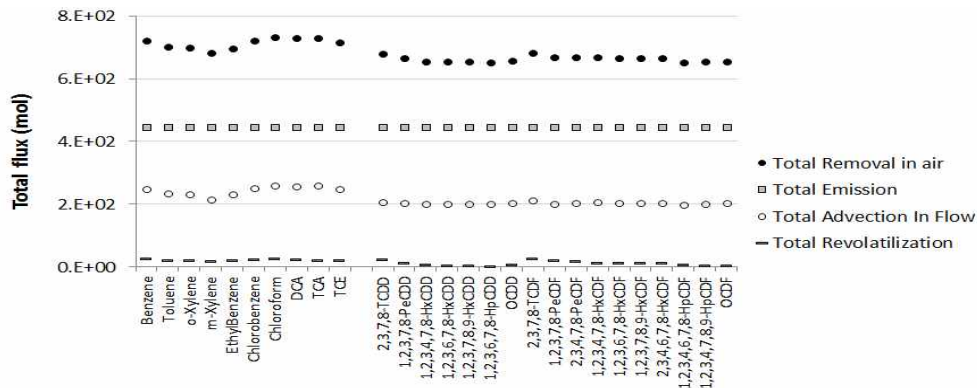
AdvectionInFlow : 이류, 수평 및 수직 난류확산에 의한 외부에서의 오염물 유입
속도 ($\text{mol}/\text{m}^3/\text{hour}$)

Emission : 배출 속도 ($\text{mol}/\text{m}^3/\text{hour}$)

대기에서 일어나는 프로세스들의 총 플럭스량을 비교해보면 <그림 13>과 같이 총 제거기작의 속도 상수가 가장 크므로 대기 중 손실 프로세스가 대기 농도 변화에 가장 주요한 영향을 끼치는 것을 알 수 있다.

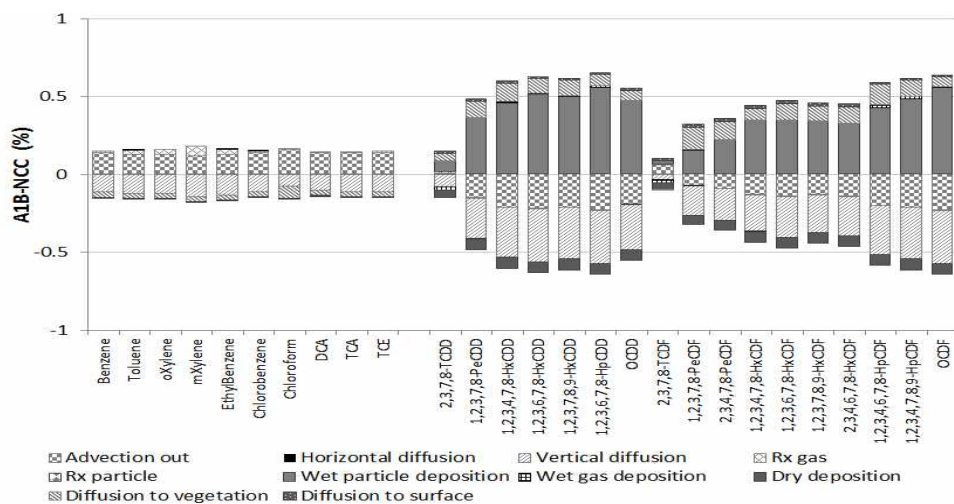
따라서 기후변화로 인한 대기 중 농도 변화에 영향을 미치는 손실프로세스를 살펴보기 위하여 <그림 14>에서 대기에서 발생된 단위유입량에 대한 손실프로세스의 기여율($\frac{\text{각 손실프로세스의 양}}{\text{유입프로세스들의 총량}} \times 100 (\%)$)을 기후변화 전후 차이로 나타내었다. 모형 실행기간 50년 동안의 총 누적 플럭스를 이용하였으며 오염물이 서울 지역 자체만 배출이 되어도 바람에 의한 이류 및 확산에 의하여 대상 지역 외부로 나갔다가 다시 유입되는 양이 화합물마다 다르기 때문에 대기에서 일어나는 각 프로세스를 총 유입량으로 정규화 하였다. 이류는 VOCs의 경우 기후변화 후 기여율이 약 0.15% 증가하였으나 PCDDs/DFs의 경우는 약 0.15% 감소하였고 수직 확산은 모든 화합물에서 감소하였다. VOCs의 경우는 광분해 반응은 증가(0.02%), 식생으로의 발산(-0.04%)은 감소하였고, PCDDs/DFs의 경우 입자상 흡착침적(0.36%)은 증가하였다.

이의 원인을 분석하기 위하여 특정 시점에 매질에 남아있는 오염물량의 영향을 배제하고 기상인자, 환경 인자 및 오염물의 물리화학적 특성에 의한 영향만을 반영하도록 손실프로세스들의 속도 상수를 분리하여 분석하였다. 이는 기후변화 전후 각각의 기상 조건에서 여러 화합물질에 대하여 동일한 배출량을 주었기 때문에 총 손실프로세스의 속도 상수를 비교하면 분석 지역의 농도 변화 경향을 파악할 수 있으며, 환경인자가 동일한 하나의 분석지역을 대상으로 하므로 속도 상수는 기상인자와 물성인자에 의해 그 정도가 결정된다. 대기 중 오염물의 총 손실프로세스들의 속도 상수의 합을 식(5.2)으로 나타내었다.



<그림 13> 대기에서 일어나는 프로세스들의 총 플럭스량 (모형 실행 기간 동안의 총 50년 누적값, NCC, 단위: mol)

(Total Removal in air: 대기 중 제거기작에 의한 총 플럭스량/ Total Emission: 총 배출량/ Total Advection in Flow: 이류, 수평 및 수직 난류확산에 의한 외부로부터 유입되는 총 플럭스량/ Total Revolatilization: 하부매질로부터 대기로 재휘발되어 유입되는 총 플럭스량)



<그림 14> 모형 실행 기간 동안의 총유입량으로 정규화한 대기 손실프로세스 기여율의 기후변화전후 차이(A1B-NCC) (단위: %)

(Advection in out: 대기 중 오염물의 바람에 의한 외부로의 이류/ Horizontal diffusion: 대기 중 오염물의 수평 난류 확산/ Vertical diffusion: 대기 중 오염물의 수직 난류 확산/ Rx gas: 대기 중 가스상 오염물의 광산화제인 히드록시라디칼에 의한 광분해 반응/ Rx particle: 대기 중 입자상 오염물의 광분해 반응/ Wet particle deposition: 입자상 오염물의 습식침적/ Wet gas deposition: 가스상 오염물의 습식침적/ Dry deposition: 입자상 오염물의 건식침적/ Diffusion to vegetation: 대기에서 식생으로의 오염물의 흡수/ Diffusion to surface: 대기에서 지표로의 오염물의 흡수)

$$k_{TRemoval,air} = k_{Adv} + k_{HDiff} + k_{VDiff} + k_{Rx} + k_{PScav} + k_{GScav} + k_{Dry} \quad \dots(5.2)$$

$$+ k_{Abs,s} + k_{Abs,w} + k_{Abs,veg}$$

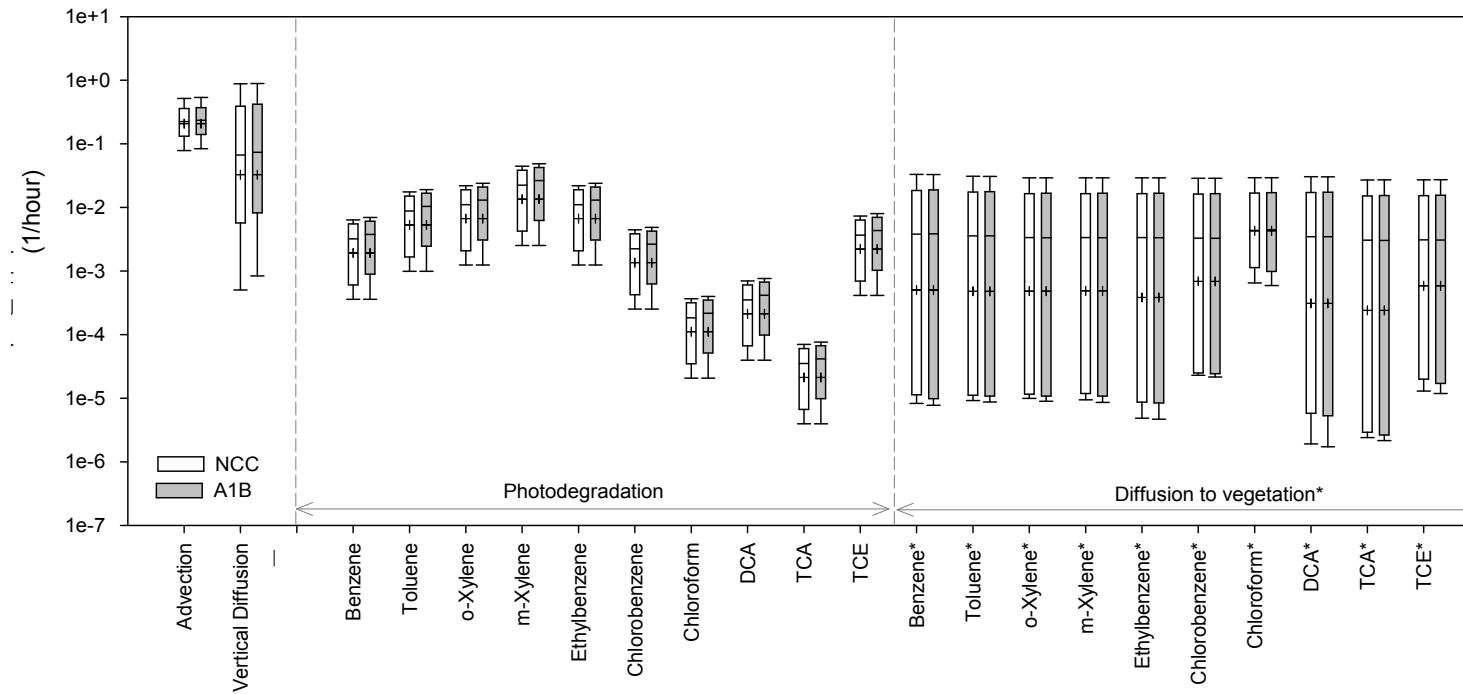
- k_{Adv} : 이류에 의한 오염물의 제거 속도 상수 (1/hour)
 k_{HDiff} : 수평 난류확산에 의한 오염물의 제거 속도 상수 (1/hour)
 k_{VDiff} : 수직 난류확산에 의한 오염물의 제거 속도 상수 (1/hour)
 k_{Rx} : 광분해 반응에 의한 오염물의 제거 속도 상수 (1/hour)
 k_{PScav} : 입자상 흡착침적에 의한 오염물의 제거 속도 상수 (1/hour)
 k_{GScav} : 가스상 흡착침적에 의한 오염물의 제거 속도 상수 (1/hour)
 k_{Dry} : 입자상 건식침적에 의한 오염물의 제거 속도 상수 (1/hour)
 $k_{Abs,veg}$: 식생으로 흡수에 의한 오염물의 제거 속도 상수 (1/hour)
 $k_{Abs,s}$: 토양으로 흡수에 의한 오염물의 제거 속도 상수 (1/hour)
 $k_{Abs,w}$: 수체로 흡수에 의한 오염물의 제거 속도 상수 (1/hour)

식(5.2)에서 제시된 제거 속도 상수 중에서 <그림 14>에 나타난 화학물질별 주요 손실프로세스에 대한 속도 상수를 중심으로 분석하였다. <그림 15>과 같이 VOCs는 이류와 수직 난류 확산의 제거 속도 상수가 가장 빠르고 광분해 제거 속도 상수의 기하 평균값이 Chloroform, DCA, TCA를 제외한 모든 화학물질에서 식생으로 흡수되는 플럭스의 기하 평균값보다 큰 값을 가진다. 또한 기후변화로 인해 기온이 증가하여 광분해 제거기작 속도 상수가 증가하더라도 이류와 수직 난류확산을 능가하지 못한다.

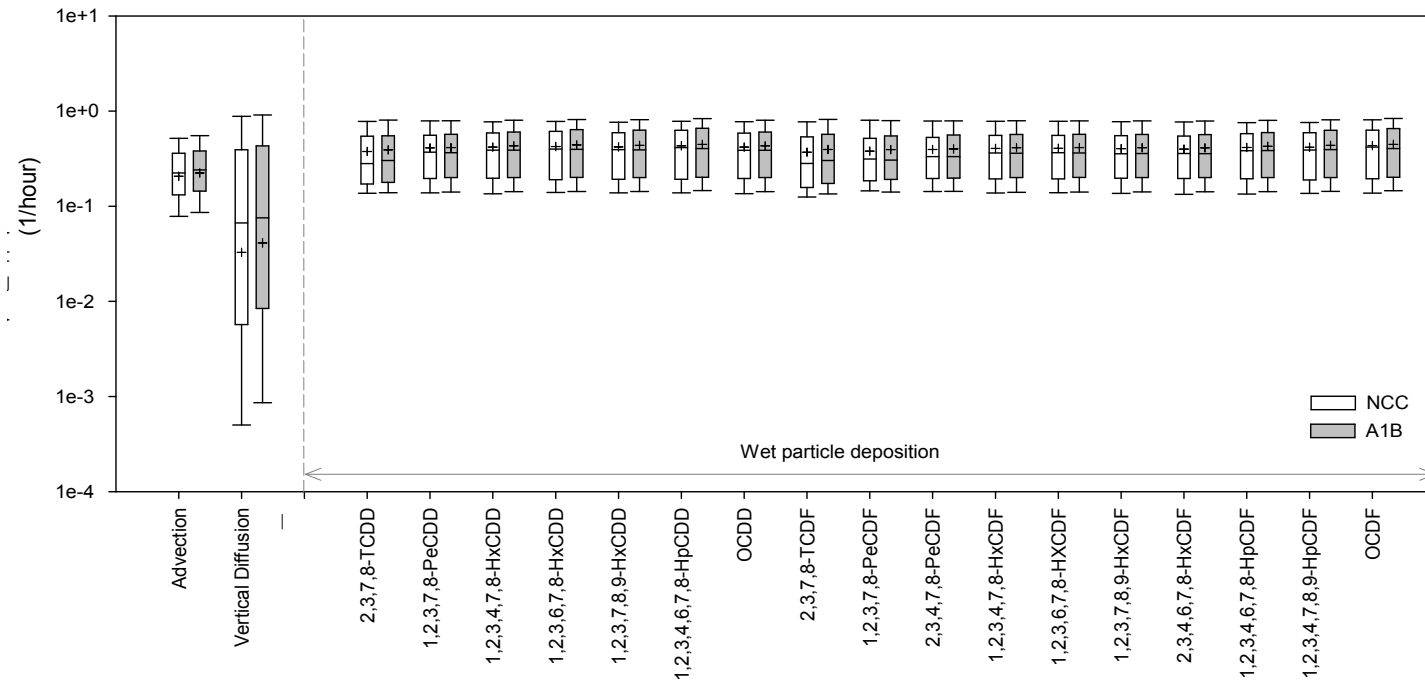
<그림 15>과 <그림 16>과 같이 이류와 수직 난류확산 기작의 속도상수는 화학물질의 물성에 상관없이 기상인자만의 영향을 받으므로 모든 화학물질에서 동일한데, 두 기작을 비교하면 상위 10%의 속도 상수 값은 수직 난류확산이 크지만 값의 중앙값과 기하 평균값이 모두 이류가 수직 난류 확산보다 크다. 또한 각각의 기상 시나리오에서 발생하는 이류의 속도 상수와 수직 난류확산 속도 상수를 비교해

보면 이류가 수직 난류확산보다 크게 발생하는 기간이 모형 실행 기간 동안 기후변화 전에는 62.8%, 기후변화 후에는 71.8%으로 크게 나타나 이류에 의한 제거가 우선적으로 발생하는 빈도가 기후변화 후 증가한 것을 알 수 있었다. 따라서 VOCs의 경우는 대기 중 이류가 가장 중요한 프로세스가 되고, 이는 기후변화 후에도 증가하므로 상대적으로 수직 난류확산의 기여는 감소하게 된다(<그림 14> 참조). 따라서 VOCs는 바람에 의한 이류량에 따라 대기 중 농도 변화가 결정되리라는 것을 예상할 수 있다.

반면, PCDDs/DFs의 경우는 입자상 습식침적에 의한 오염물의 제거 속도가 이류와 수직 난류확산의 속도 상수보다 크기 때문에 PCDDs/DFs에서는 입자상 습식침적이 가장 중요하게 된다. 기후변화 후에도 강우빈도가 증가하여 입자상 습식침적의 속도상수가 다른 기작보다 가장 크므로, 가장 중요한 프로세스로 기여하게 되고, 상대적으로 이류와 수직 난류확산의 기여는 감소하게 된다(<그림 14> 참조).



<그림 15> 대기 중 VOCs의 주요 손실프로세스의 속도 상수 비교 (단위: 1/hour)
 (박스플롯 : 1사분위수(25%), 중앙값(50%), 3사분위수(75%), 오차막대: 10%/90%, +: 기하평균)

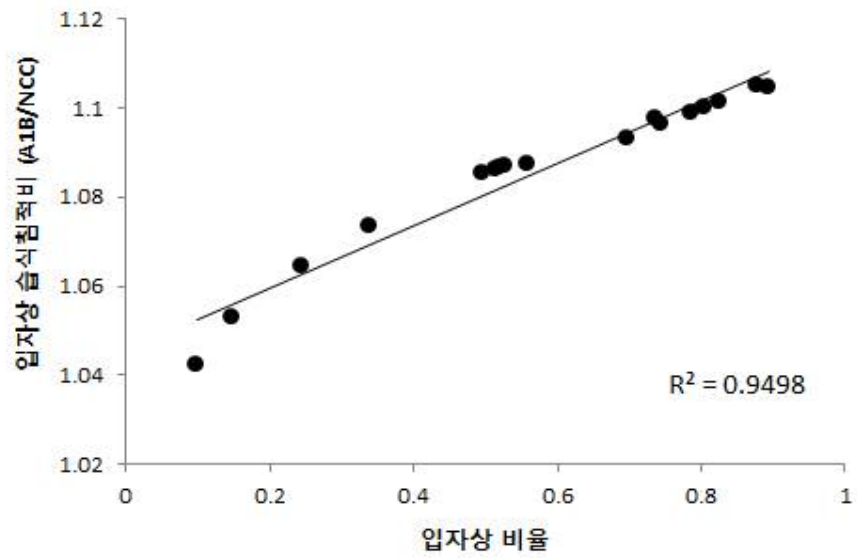


<그림 16> 대기 중 PCDDs/DFs의 주요 손실프로세스의 속도 상수 비교 (단위: 1/hour)
 (박스플롯 : 1사분위수(25%), 중앙값(50%), 3사분위수(75%), 오차막대: 10%/90%, +: 기하평균)

결국 기후변화로 인해 주로 대기에서 하부매질로 이동하는 오염물은 대기 중에서 대부분 입자상으로 존재하는 PCDDs/DFs로 입자상 습식침적 과정에 의해 이동됨을 알 수 있다. PCDDs/DFs의 경우 염소(Chlorine)의 개수가 증가할수록 입자상 비율이 커지게 되고 입자상 습식침적비(A1B/NCC)와 오염물의 입자상 비율은 높은 상관관계($r^2=0.95$)를 보인다(<그림 17> 참조).

또한 기후시나리오에 의한 온도 증가만을 고려할 때는 입자상 비율이 작아지기 때문에(<그림 1-(b)> 참조) PCDDs/DFs의 입자상 습식침적량은 감소할 것으로 예측되지만 모형 실행 결과에 의하면 PCDDs/DFs에서 입자상 습식침적량은 기후변화 후 증가하였다(<그림 14> 참조). 이 원인을 분석하기 위하여 기후변화로 인한 기상 인자와 입자상 습식침적비 간의 상관분석 결과를 <표 2>에 나타내었다. 강수빈도와 입자상 습식침적비 간의 상관관계수가 0.8이상으로 입자상 습식침적량이 온도의 영향보다 강수빈도의 영향을 더 크게 받았음을 보여준다. 이는 A1B시나리오 조건 하에서 기후변화로 강수빈도가 증가하면 습식침적량이 증가하므로, 대기 중 입자상 농도가 높은 화합물은 농도 감소가 크게 나타나게 되어, PCDDs/DFs는 <그림 10>과 같이 물질별로 약간의 차이를 보이는 대기 농도 감소 유형이 나타나게 됨을 알 수 있다.

따라서 두 화합물질에서 대기 농도의 감소는 동일하였지만 그 주요 원인은 다르게 나타났다. VOCs의 경우는 바람에 의한 제거의 증가가 가장 중요한 감소 이유였고, PCDDs/DFs의 경우는 입자상 습식침적에 의한 대기에서 지표로의 플럭스 증가가 가장 중요한 감소 이유가 되어 대기의 기후변화로 인한 평균 농도비(A1B/NCC)를 감소시키게 된다(<그림 10> 참조). 오염물의 대기 중 농도의 증감은 대기 중 손실 프로세스들 중 가장 지배적인 프로세스에 의해 결정되고, 기후변화로 풍속이 증가하면 대기 중 농도가 감소할 것이라는 예측을 할 수 있다. 또한 입자상 비율이 큰 오염물질일수록 기후변화로 인하여 강수 패턴 특히 강수 빈도가 증가하게 될 경우 대기에서 하부 매질로의 침적을 증가시켜 대기 농도를 더 감소시킬 것이다.



<그림 17> 대기 중 PCDDs/DFs의 입자상 습식침적비와 입자상 분율(온도 15℃)과의 상관관계(입자상 습식침적량은 모형 실행 기간 50년 동안의 총 플럭스 누적값)

<표 2> 입자상 습식침적비(A1B/NCC)와 기상인자 간 상관계수

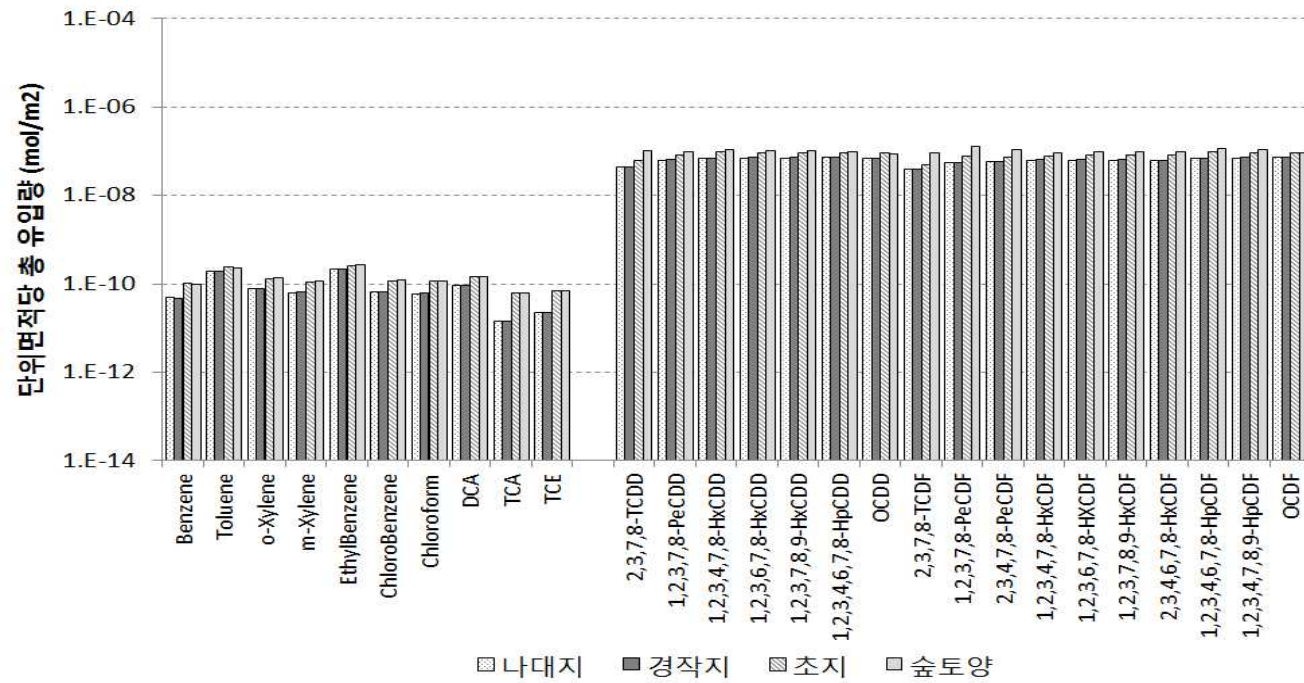
	월평균풍속비	강수빈도비	월강수량비	온도증감량
Benzene	-0.30	0.66	0.40	0.08
Toluene	-0.30	0.65	0.40	0.06
o-Xylene	-0.29	0.64	0.39	0.05
m-Xylene	-0.30	0.65	0.39	0.05
EthylBenzene	-0.30	0.64	0.39	0.05
ChloroBenzene	-0.29	0.64	0.39	0.05
Chloroform	-0.30	0.67	0.41	0.09
DCA	-0.30	0.66	0.40	0.08
TCA	-0.30	0.66	0.41	0.08
TCE	-0.30	0.65	0.40	0.07
2,3,7,8-TCDD	-0.26	0.81	0.46	0.18
1,2,3,7,8-PeCDD	-0.23	0.86	0.51	0.23
1,2,3,4,7,8-HxCDD	-0.23	0.87	0.51	0.24
1,2,3,6,7,8-HxCDD	-0.22	0.88	0.52	0.24
1,2,3,7,8,9-HxCDD	-0.22	0.88	0.52	0.24
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	-0.22	0.88	0.52	0.24
OCDD	-0.22	0.87	0.52	0.24
2,3,7,8-TCDF	-0.27	0.79	0.44	0.17
1,2,3,7,8-PeCDF	-0.26	0.83	0.45	0.20
2,3,4,7,8-PeCDF	-0.25	0.84	0.47	0.21
1,2,3,4,7,8-HxCDF	-0.23	0.86	0.50	0.23
1,2,3,6,7,8-HxCDF	-0.23	0.86	0.50	0.23
1,2,3,7,8,9-HxCDF	-0.23	0.86	0.50	0.23
2,3,4,6,7,8-HxCDF	-0.23	0.86	0.50	0.22
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	-0.23	0.87	0.49	0.23
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	-0.22	0.88	0.51	0.24
OCDF	-0.22	0.88	0.52	0.24

2) 토양

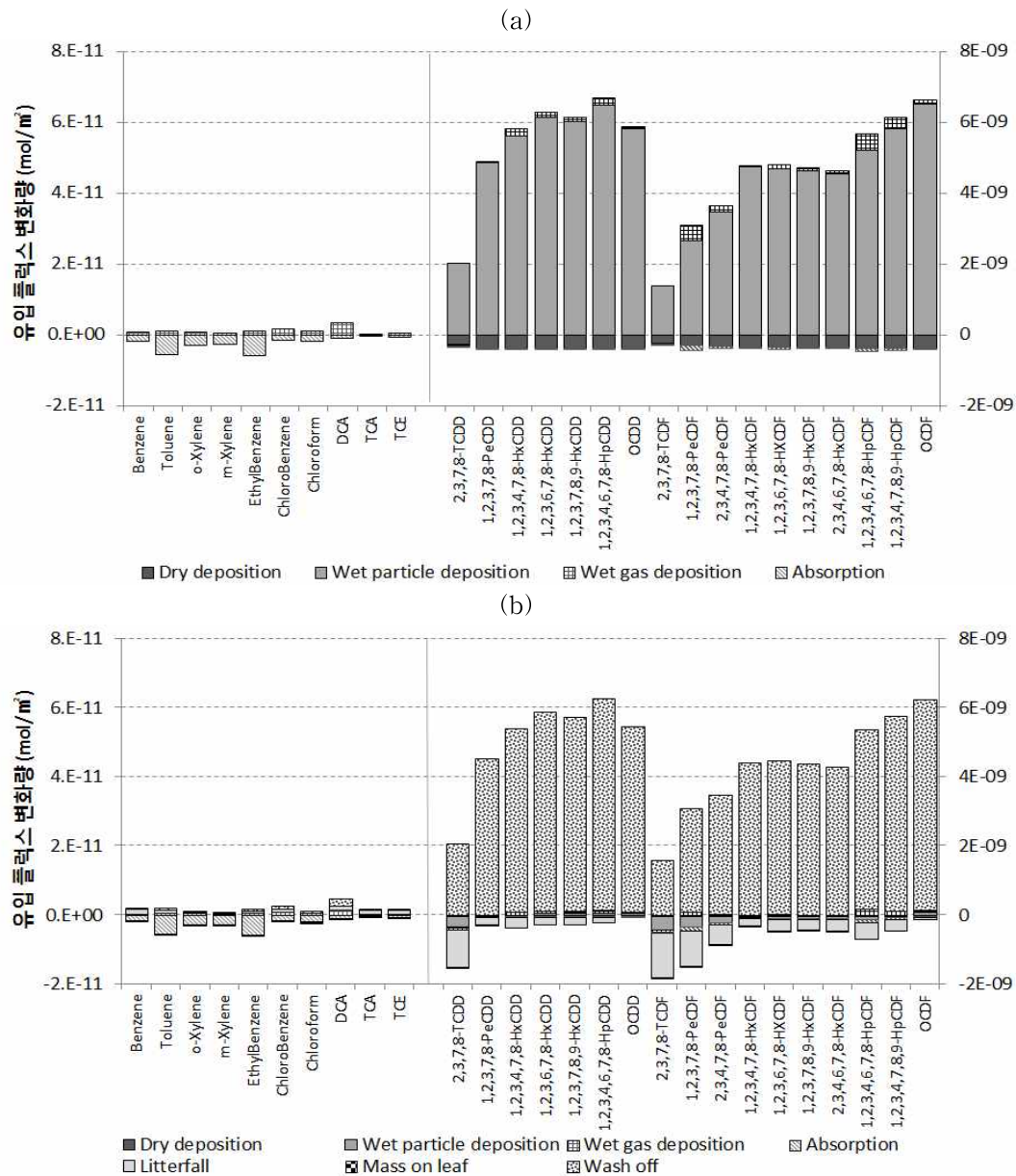
토양에서 PCDDs/DFs는 VOCs에 비해 약 십만 배 이상의 큰 농도를 가지므로 다른 매질에 비해 두 화학물질 간 농도 차이가 가장 크다.(<그림 8>과 <그림 9> 참조). 기후변화에 따른 마지막 10년의 토양 평균 농도비에서는 VOCs가 0.9 내외로 숲토양의 Chlorobenzen, DCA, TCA, TCE를 제외하고 모두 감소하며, DCA의 경우는 다른 VOCs에 비해 월평균 농도비가 최대 7배까지 증가 한다(<그림 11> 참조). PCDDs/DFs의 경우는 VOCs에 비해 토양 평균 농도비가 1.1배까지 증가하는 경향을 보인다.

토양의 경우는 자체 배출원이 없고 대기로부터 기원되는 오염물질에 의해 농도가 변화되므로 유입되는 오염물의 양이 중요하다. 따라서 <그림 18>과 같이 A1B 시나리오에서 대기와 식생으로부터 토양으로 유입되는 단위면적당 총 유입량을 비교하면, VOCs에 비해 PCDDs/DFs의 오염물 유입량이 백 배 이상 큰 것을 알 수 있다. 이는 주로 대기에서 바람에 의한 이류 및 확산, 광분해에 의해 제거되는 VOCs에 비해 입자상으로 대부분 존재하는 PCDDs/DFs은 대기로부터 입자상 습식 침적을 통해 지표로 이동하기 때문이다.

또한 식생의 유무에 따라 나대지와 숲토양을 중심으로 <그림 20>과 같이 기후변화로 인한 단위 면적당 토양으로의 오염물 유입량의 차이를 비교하면 VOCs의 경우는 대기로부터의 흡수, 낙엽에 의한 유입이 지배적이며 PCDDs/DFs는 입자상 습식침적과 세정에 의한 유입이 지배적이다. 나대지의 경우 대기로부터 오염물이 직접적으로 모두 유입되므로 입자상 습식침적의 기여가 가장 크지만 식생이 있는 숲토양의 경우 대기로부터 침적되는 오염물질이 식생에 의하여 잎 표면에 있다가 강우와 같은 기상요인이나 계절적 요인에 의하여 세정이나 낙엽에 의하여 토양으로 유입된다. 대기 중 입자상으로 존재하는 비율이 높을수록 입자상 습식침적, 강우에 의한 세정량이 증가하므로 대기 중 오염물의 입자상 비율이 커짐에 따라 기후변화에 따른 토양 평균 농도비도 증가하게 나타난다.



<그림 18> A1B시나리오에 따른 토양의 모형 실행 기간 동안의 단위면적당 총 유입량 (단위: mol/m^2)



<그림 19> 기후변화로 인한 단위면적당 유입프로세스의 차이(A1B-NCC) (a) 나 대지 (b) 숲토양 (단위: %)

(Dry deposition: 입자상 오염물의 건식침적/ Wet particle deposition: 입자상 오염물의 습식침적/ Wet gas deposition: 가스상 오염물의 습식침적/ Absorption: 대기에서 토양으로의 오염물의 흡수/ Litterfall: 식생의 낙엽에 의한 오염물의 토양으로의 유입/ Mass on leaf: 식생 위에 남아있던 오염물의 토양으로의 유입/ Wash off: 오염물의 세정에 의한 토양으로의 유입)

따라서 토양으로 유입되는 오염물량이 많은 PCDDs/DFs의 경우 기후변화로 인해 강수빈도가 증가하면 이에 따라 입자상 습식침적량도 증가하여 대기로부터 지표로 이동하므로 기후변화 후 더 많은 양의 오염물이 <그림 19>와 같이 토양으로 유입되었다. 이렇게 유입된 오염물이 토양내의 여러 제거 기작을 통해 토양 농도를 변화시키는데 이를 시간에 따른 토양에서의 오염물 농도 변화 식(5.3)으로 나타내었다.

$$\frac{dC_{soil}}{dt} = (k_{Dry} + k_{PScav}) \cdot \phi \cdot C_{air} + k_{Abs} \cdot (1 - \phi) \cdot C_{air} + k_{Litterfall} \cdot C_{veg} \dots (5.3) \\ - (k_{vol,s} + k_{SRO} + k_{WRO} + k_{Rx,s} + k_{Leaching} + k_{RootUptake}) \cdot C_{soil}$$

ϕ : 대기 중 입자상 오염물 비율

$k_{Litterfall}$: 식생의 낙엽에 의한 오염물의 유입 속도 상수 (1/hour)

k_{SRO} : 토사 유출에 의한 제거 속도 상수 (1/hour)

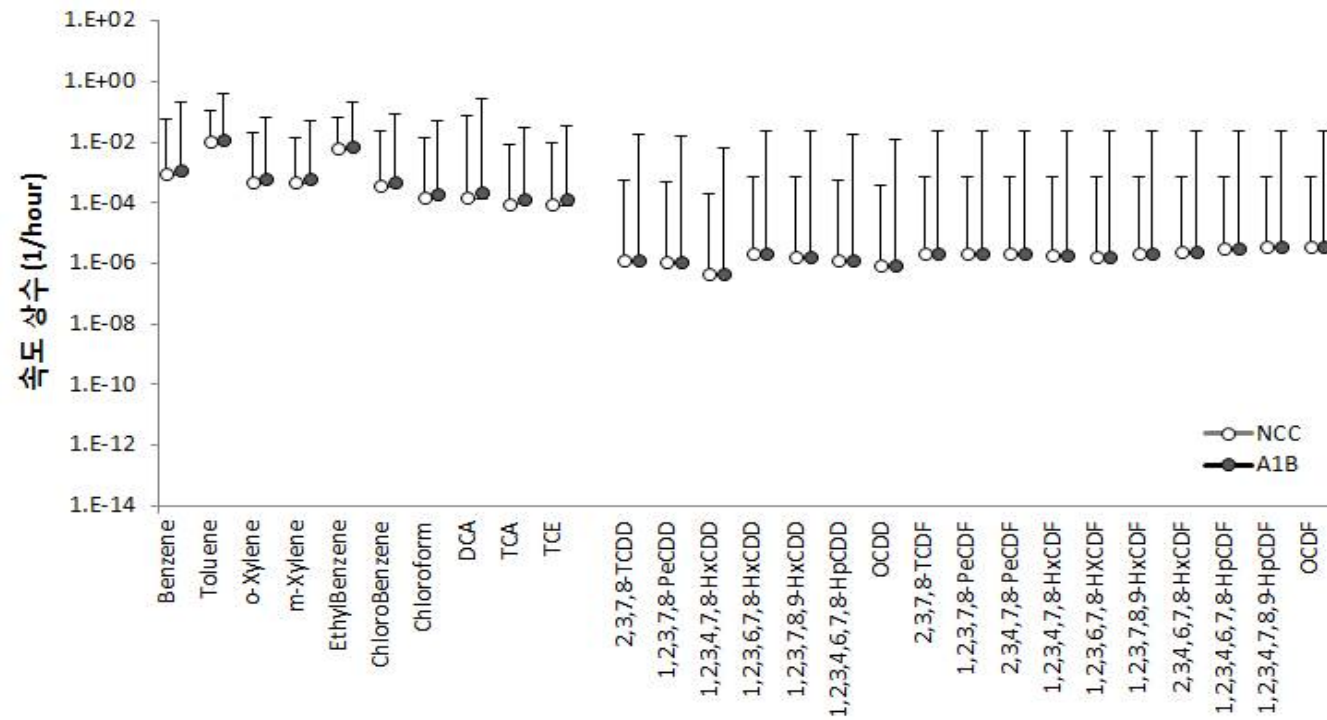
k_{WRO} : 강우 유출에 의한 제거 속도 상수 (1/hour)

$k_{Rx,s}$: 토양 내 분해 반응에 의한 제거 속도 상수 (1/hour)

$k_{Leaching}$: 침출에 의한 제거 속도 상수 (1/hour)

$k_{RootUptake}$: 식물의 뿌리에 의한 흡수에 의한 제거 속도 상수 (1/hour)

대기와 식생으로부터 유입된 오염물은 대기로의 휘발, 강우 발생 시 각각 입자상·용존상 오염물이 수체로 이동하는 토사 유출과 강우 유출, 토양 내 분해 반응, 침출, 식생의 뿌리에 의한 흡수에 의하여 손실된다. 따라서 토양 중 총 손실프로세스의 속도 상수를 나대지를 대상으로 <그림 20>에 나타내었다. VOCs는 토양으로의 오염물 유입량이 작으면서 제거 속도 상수는 큰데 반해 PCDDs/DFs는 오염물 유입량이 크면서 제거 속도 상수는 작기 때문에 토양 내 잔류량이 많아 높은 농도가 나타난다(<그림 19>와 <그림20> 참조).



<그림 20> 나대지에서 오염물의 손실프로세스의 총 제거 속도 상수 (단위: 1/hour) (●:기하평균, 오차막대: 최대값)

기후변화로 인한 토양 손실프로세스의 기여율 변화를 <그림 21>에서 보면, VOCs의 경우는 분해 반응 및 강우 유출이 가장 큰 손실프로세스를 차지하여 분해 반응은 기후변화 후 기여율이 증가하고 강우 유출은 기여율이 감소하였다. PCDDs/DFs의 경우는 강우 유출 및 토사 유출이 가장 중요한 손실 프로세스으로써 특히 기후변화 후 전체 손실 프로세스 중 토사 유출 기여율의 증가가 90% 이상으로 대부분을 차지하고 있다.

이의 원인을 분석하기 위하여 식(5.4)에서 제시된 토양의 제거 속도 상수 중에서 <그림 21>에서 나타난 주요 손실 프로세스에 대한 속도 상수를 중심으로 분석하였다. <그림 22>와 같이 VOCs의 경우 분해 반응 속도 상수와 강우 유출 속도 상수가 토사 유출 속도 상수보다 크다. 이 때 속도 상수의 기후변화로 인한 차이는 거의 없고 강우 유출의 기여는 감소하는데 이것은 강우 유출의 제거 속도 상수가 크더라도 토양으로 유입되는 VOCs의 오염물의 양이 기후변화로 인해 감소되었기 때문이다. 다음은 단위시간당 강우 유출되는 오염물질의 농도변화와 토사 유출되는 오염물의 농도 변화를 각각 식(5.5)와 식(5.6)으로 나타내었다.

$$\begin{aligned} \left[\frac{dC_{soil}}{dt} \right]_{Water\,Runoff} &= -(U_{WRO} \cdot Area/K_{sm\,sw}) \cdot C_{soil} \\ &= -(U_{WRO} \cdot Area/K_{sm\,sw}) \cdot M_{soil}/(Area \cdot Soil\,depth) \end{aligned} \quad \dots(5.5)$$

$$\begin{aligned} \left[\frac{dC_{soil}}{dt} \right]_{Solid\,Runoff} &= -(U_{SRO} \cdot Area/K_{sm\,sp}) \cdot C_{soil} \\ &= -(U_{SRO} \cdot Area/K_{sm\,sp}) \cdot M_{soil}/(Area \cdot Soil\,depth) \end{aligned} \quad \dots(5.6)$$

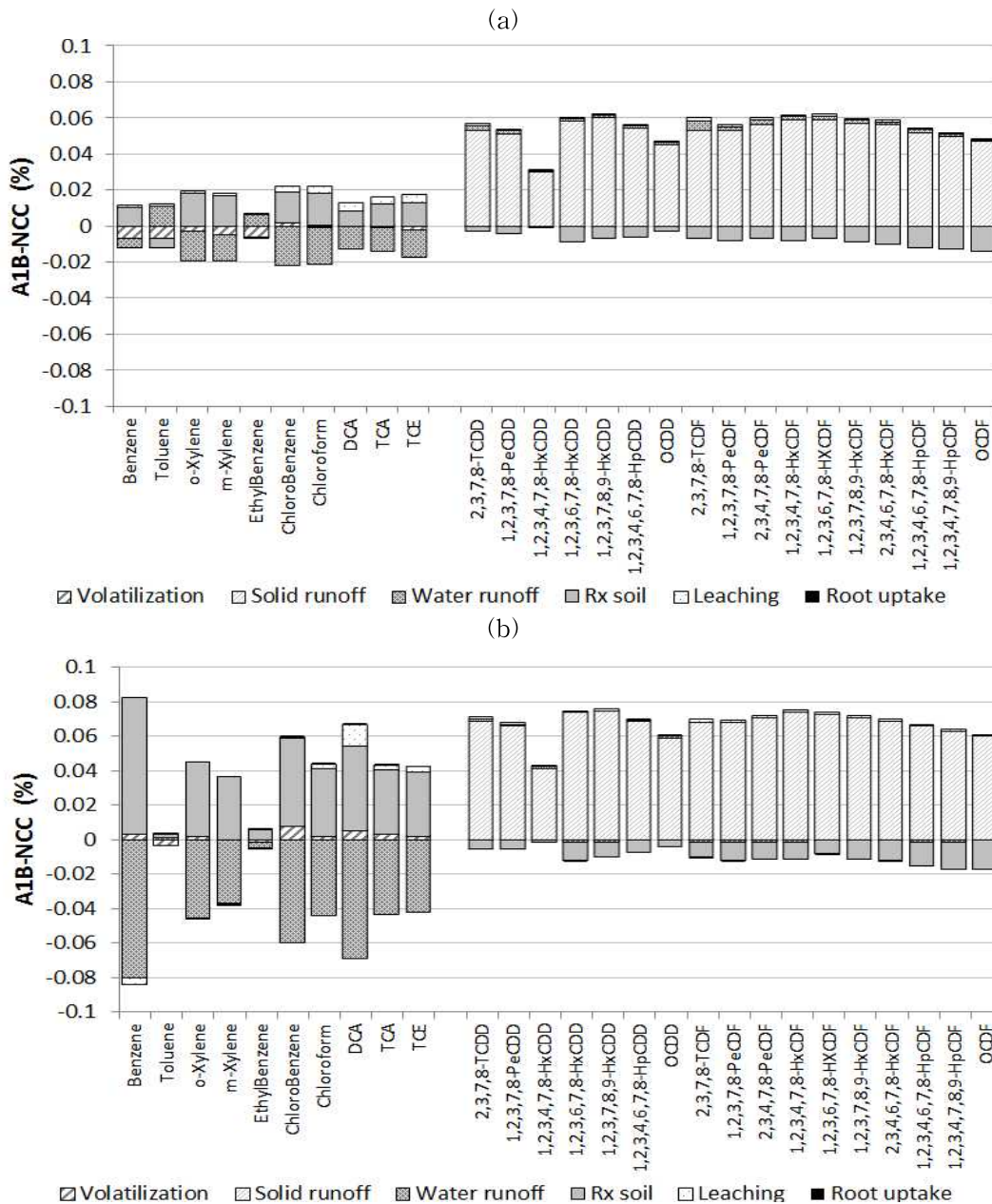
U_{WRO} : 강우 유출 속도 ($m/m^2/hour$)

$Area$: 토양의 지표면적 (m^2)

C_{soil} : 오염물의 토양 중 농도 (mol/m^3)

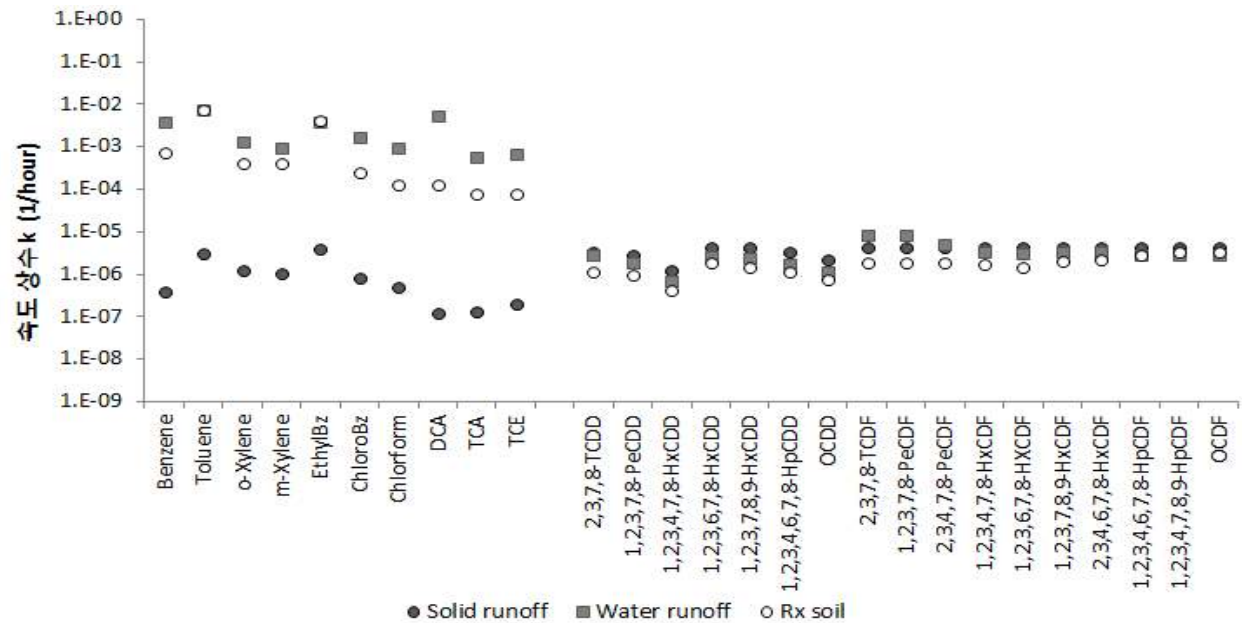
M_{soil} : 토양 내 오염물의 질량 (mol)

$K_{sm\,sw}$: 토양매질-토양내용존상 간 오염물의 분배 계수



<그림 21> 모형 실행 기간 동안의 총유입량으로 정규화한 토양 손실프로세스 기여율의 기후변화전후 차이(A1B-NCC) (단위: %) (a) 나대지 (b) 숲토양

(Volatilization: 대기로의 휘발/ Solid runoff: 강우 발생 시 발생하는 입자상 오염물의 토사 유출/ Water runoff: 강우 발생 시 발생하는 용존상 오염물의 강우 유출/ Rx soil: 오염물의 토양 내 분해 반응/ Leaching: 오염물의 침출/ Root uptake: 식물의 뿌리에 의한 오염물의 흡수)



<그림 22> 토양 중 VOCs와 PCDDs/DFs의 주요 손실프로세스의 속도 상수 비교. 오차막대로 표시된 기후변화 전(NCC) 값이 그림 상에서 구분하기 어렵다. 이는 기후변화 전후의 토양 손실프로세스 속도 상수의 차이가 거의 없음을 의미한다. (표식: 모형 실행 기간 마지막 10년간의 속도 상수의 기하평균(A1B), 오차막대: 모형 실행 기간 첫해의 속도 상수의 기하평균(NCC)) (단위: 1/hour)

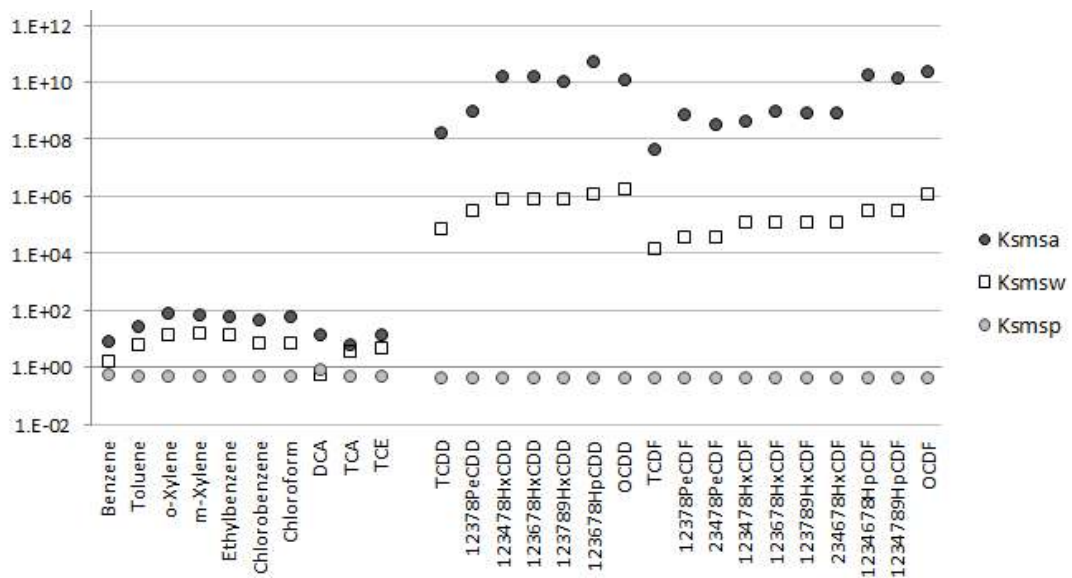
$Soildepth$: 토양 깊이 (m)

U_{SRO} : 토사 유출 속도 ($m/m^2/hour$)

$K_{sm sp}$: 토양매질-토양내입자상 간 오염물의 분배 계수

식(5.5)에서 $K_{sm sw}$ 값은 <그림 23>과 같이 PCDDs/DFs가 VOCs에 비해 크므로 강수 유출에 의한 속도 상수가 PCDDs/DFs에서는 VOCs에 비해 작아져 토사 유출 속도 상수와 비슷한 값을 가지게 된다(<그림 22> 참조). 두 프로세스의 속도 상수 모두 기후변화 전후의 차이가 거의 없지만 기후변화로 인한 강수빈도의 증가로 입자상 습식침적에 의하여 PCDDs/DFs의 토양으로 유입되는 입자상 오염물량을 증가·축적시키므로 식(5.6)의 C_{soil} 값이 증가되어 토사 유출에 의한 제거의 기여가 PCDDs/DFs에서 기후변화 후 가장 중요한 프로세스로 나타났다(<그림 21> 참조).

따라서 토양에서는 주요 손실프로세스들의 기후변화 전후의 속도 상수 차이로 인한 영향보다는 토양으로부터 들어오는 유입량이 기후변화로 인한 토양 농도 변화의 중요한 원인이 된다. 기후변화 후 VOCs의 경우 대기에서 토양으로의 유입량이 감소하므로 토양 농도 또한 감소하게 되며, PCDDs/DFs의 경우 대기로부터 유입되는 오염물량이 증가하여 기후변화 후 토양 농도가 증가하며 토사 유출도 증가하게 된다. 이때, 기후변화로 인한 토사 유출량의 변화는 강수에 의한 토양 유실과 오염물의 토양입자에 흡수되는 정도, 즉 octanol-water partition coefficient (K_{ow})에 의해 결정된다. <표 3>과 <표 4>는 기상인자와 기후변화 전후의 토사 유출비와의 상관관계를 나타낸 것이다. 기후변화에 따른 월강수량비와 상관관계수 0.7이상의 높은 상관관계를 나타내었는데 이는 기후변화로 인한 강수량의 증가로 토사 유출량이 많아지면 토양입자에 흡수되어 제거되는 오염물의 양이 많아짐을 의미한다. 또한 <그림 24>는 기후변화에 따른 PCDDs/DFs의 K_{ow} 와 토사 유출비와의 관계를 나타낸 것으로, 토사 유출이 주요 제거기작으로 작용하는 PCDDs/DFs의 경우 동일한 토사 유실량 조건하에서, K_{ow} 값이 클수록 토양입자에 흡수되어 제거되는 오염물의 양이 크다는 것을 의미한다.



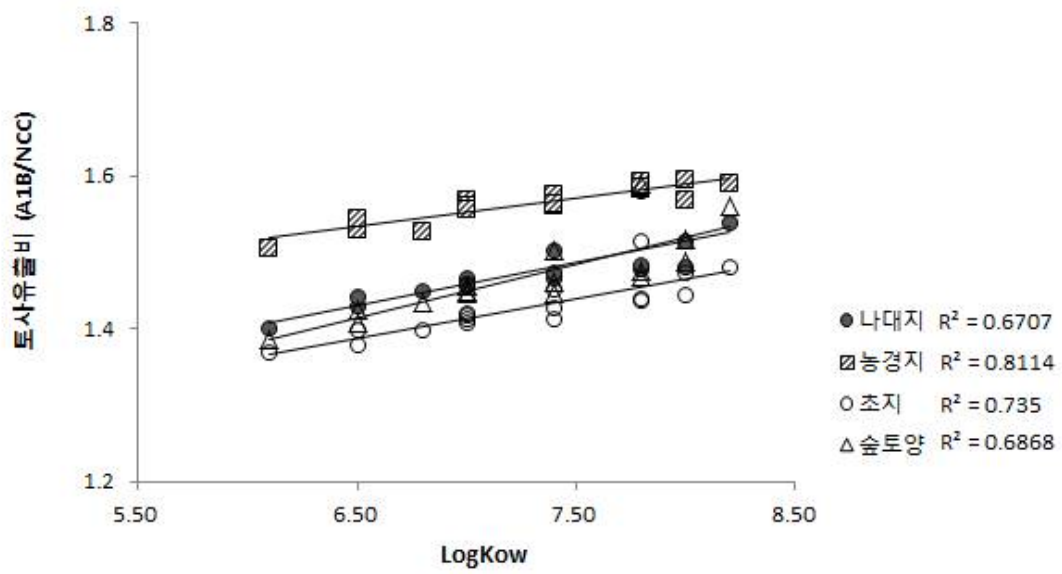
<그림 23> 대상 화학물질에 따른 Kmsa, Kmsw, Kmsp 값
 (Kmsa: 토양매질-토양내가스상 간 오염물의 분배 계수, Kmsw: 토양매질-토양
 내용존상 간 오염물의 분배 계수, Kmsp: 토양매질-토양내용존상 간 오염물의 분
 배 계수)

<표 3> 나대지의 토사 유출비(A1B/NCC)와 기상인자의 상관계수

	월평균풍속비	강수빈도비	월강수량비	온도증감량
Benzene	-0.04	0.33	0.77	0.04
Toluene	-0.04	0.31	0.73	0.05
o-Xylene	-0.04	0.32	0.77	0.04
m-Xylene	-0.04	0.32	0.77	0.04
EthylBenzene	-0.04	0.32	0.75	0.05
ChloroBenzene	-0.04	0.32	0.77	0.04
Chloroform	-0.04	0.31	0.76	0.03
DCA	-0.04	0.31	0.74	0.03
TCA	-0.04	0.32	0.77	0.03
TCE	-0.04	0.32	0.77	0.03
2,3,7,8-TCDD	-0.03	0.33	0.78	0.04
1,2,3,7,8-PeCDD	-0.03	0.33	0.78	0.04
1,2,3,4,7,8-HxCDD	-0.03	0.33	0.78	0.04
1,2,3,6,7,8-HxCDD	-0.03	0.33	0.78	0.04
1,2,3,7,8,9-HxCDD	-0.03	0.33	0.78	0.04
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	-0.03	0.33	0.78	0.04
OCDD	-0.03	0.33	0.78	0.04
2,3,7,8-TCDF	-0.03	0.33	0.78	0.04
1,2,3,7,8-PeCDF	-0.03	0.33	0.78	0.04
2,3,4,7,8-PeCDF	-0.03	0.33	0.78	0.04
1,2,3,4,7,8-HxCDF	-0.03	0.33	0.78	0.04
1,2,3,6,7,8-HxCDF	-0.03	0.33	0.78	0.04
1,2,3,7,8,9-HxCDF	-0.03	0.33	0.78	0.04
2,3,4,6,7,8-HxCDF	-0.03	0.33	0.78	0.04
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	-0.03	0.33	0.78	0.04
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	-0.03	0.33	0.78	0.04
OCDF	-0.03	0.33	0.78	0.04

<표 4> 숲토양의 토사 유출비(A1B/NCC)와 기상인자의 상관계수

	월평균풍속비	강수빈도비	월강수량비	온도증감량
Benzene	-0.03	0.31	0.76	0.05
Toluene	-0.03	0.32	0.73	0.05
o-Xylene	-0.03	0.32	0.77	0.04
m-Xylene	-0.03	0.32	0.77	0.04
EthylBenzene	-0.04	0.33	0.75	0.05
ChloroBenzene	-0.03	0.32	0.77	0.04
Chloroform	-0.03	0.32	0.77	0.04
DCA	-0.03	0.29	0.74	0.04
TCA	-0.03	0.33	0.78	0.04
TCE	-0.03	0.32	0.77	0.04
2,3,7,8-TCDD	-0.03	0.32	0.77	0.04
1,2,3,7,8-PeCDD	-0.03	0.33	0.77	0.04
1,2,3,4,7,8-HxCDD	-0.03	0.33	0.77	0.04
1,2,3,6,7,8-HxCDD	-0.03	0.33	0.77	0.04
1,2,3,7,8,9-HxCDD	-0.03	0.33	0.77	0.04
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	-0.03	0.33	0.77	0.04
OCDD	-0.03	0.33	0.77	0.04
2,3,7,8-TCDF	-0.03	0.32	0.77	0.04
1,2,3,7,8-PeCDF	-0.03	0.32	0.77	0.04
2,3,4,7,8-PeCDF	-0.03	0.32	0.77	0.04
1,2,3,4,7,8-HxCDF	-0.03	0.32	0.77	0.04
1,2,3,6,7,8-HxCDF	-0.03	0.32	0.77	0.04
1,2,3,7,8,9-HxCDF	-0.03	0.32	0.77	0.04
2,3,4,6,7,8-HxCDF	-0.03	0.32	0.77	0.04
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	-0.03	0.32	0.77	0.04
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	-0.03	0.33	0.77	0.04
OCDF	-0.03	0.33	0.77	0.04

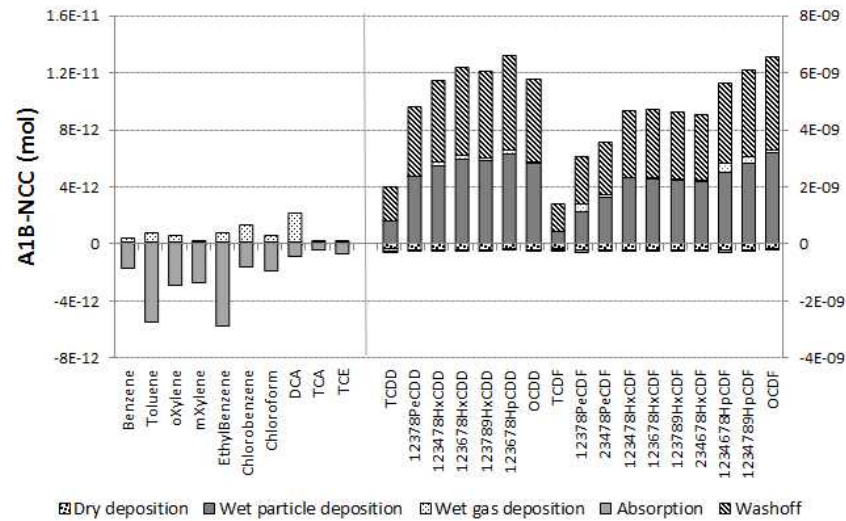


<그림 24> 토양 중 토사 유출비와 LogKow와의 상관관계

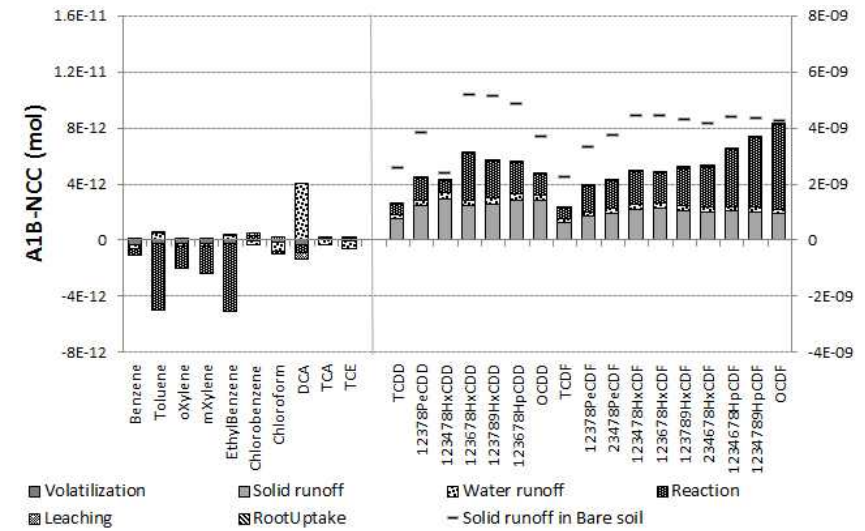
농경지의 경우 대부분의 화학물질에서 다른 종류의 토양보다 농도는 작고 기후 변화로 인한 토양 평균 농도비는 1.1배로 가장 높은 특징을 나타냈다. 단위면적당 각 토양으로의 총 유입량은 나대지와 농경지가 유사한 범위의 값을 갖는데(<그림 19> 참조) 이는 농경지의 경우 식생이 있지만 추수로 농작물의 완전 제거가 이루어지기 때문에 초지와 숲토양과 달리 낙엽을 통한 오염물의 유입이 없기 때문이다. 그러함에도 <그림 25>처럼 기후변화 전후 토양의 가장 큰 손실 프로세스인 토사 유출 증가량이 나대지에 비해 농경지에서 줄어들었고 이로 인해 농경지가 토사 유출에 의한 손실이 적어 기후변화 후 다른 토양에 비해 토양 평균 농도비가 가장 많이 증가하였다.

토사 유출의 차이로 농경지에서 오염물질의 농도가 달라지는 원인은 식(5.6)의 $K_{sm.sp}$ 와 토양깊이(Soil depth)가 토지 피복에 따라 달라지기 때문이다. PCDDs/DFs의 경우 유사한 $K_{sm.sp}$ 값(≈ 0.5)(<그림 23> 참조)을 가지지만 토양깊이는 나대지, 초지, 숲토양에 비해 농경지의 토양 깊이가 6~7배 크다(<그림 26> 참조). 농경지의 경우 모형에서 기계적인 혼합에 의해 토양의 상하가 섞이는 것을 고려하여 토양 깊이를 20cm로 사용하였지만 다른 토양의 경우 화합물 특성에 따른 토양깊이를 사용하였기 때문이다. 따라서 식(5.6)에 의하여 다른 토양에 비해 토양깊이가 큰 농경지의 경우는 토사 유출되는 오염물의 농도변화가 작아지게 되는 것이다. 또한 토양으로의 동일한 유입량을 가질 경우 토양 깊이가 깊으면 농도는 상대적으로 작아지므로 농경지의 농도가 나대지의 농도보다 낮게 나타난다(<그림 9> 참조).

또한 기후변화에 따른 토양 평균 농도비에서 DCA가 다른 토양과 달리 농경지에서는 감소하였다(<그림 11-(b)> 참조). <그림 25>를 보면 농경지에서 기후변화 전후 강우 유출이 DCA에서 증가한다. 이는 $K_{sm.sw}$ 값이 <그림 23>과 같이 DCA가 다른 VOCs에 비해 작기 때문에 식(5.5)에서 강우 유출로 인해 손실되는 오염물질의 양이 증가하기 때문이다. 이는 DCA의 헨리상수 값이 다른 VOCs에 비해 작은 것에서 기인한다.

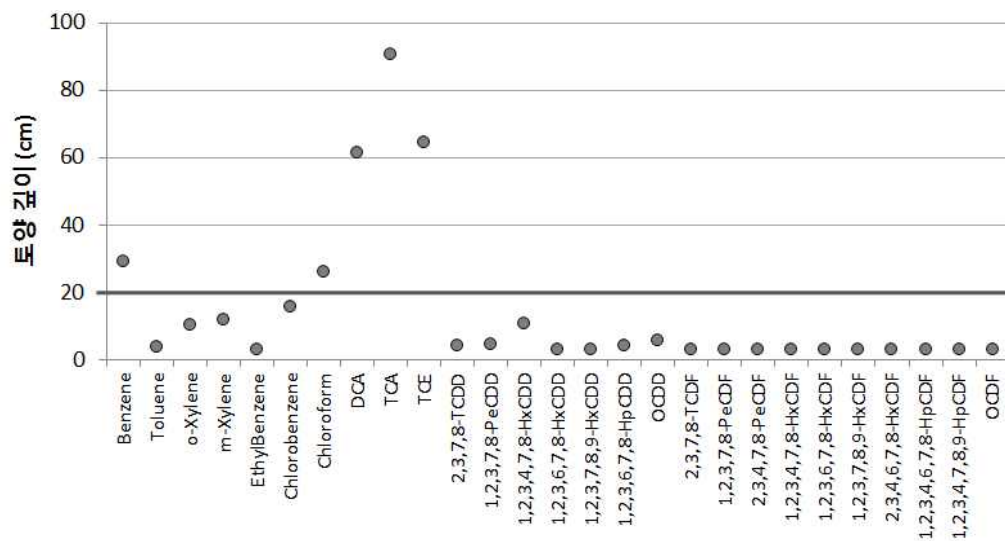


(a)



(b)

<그림 25> 모형 실행 기간 동안의 농경지의 총플럭스 누적값의 차이 (A1B-NCC) (단위: mol) (a) 유입프로세스 (b) 손실프로세스 (왼쪽축: VOCs, 오른쪽축: PCDDs/DFs)



<그림 26> 토양 깊이 (단위: cm). 본 모형에서 Damköhler number로부터 오염물의 물리화학적 특성에 따라 토양 깊이가 계산됨. 단, 농경지는 20cm로 일정(실선 부분)하며, 나대지, 초지, 숲토양은 3cm를 하한값으로 가짐.

결국 토양에서는 PCDDs/DFs이 VOCs에 비해 오염물의 유입량은 크고 손실되는 총 제거 속도 상수는 작기 때문에 토양 내 오염물이 축적되어 토양 농도가 높다. 또한 기후변화로 인하여 VOCs의 경우는 풍속의 증가로 대기에서 바람에 의한 오염물 제거가 증가하여 토양으로의 유입량이 작아지기 때문에 기후변화 후 토양 농도는 감소하게 된다. 반면 PCDDs/DFs의 경우 기후변화로 인하여 강수패턴의 변화, 특히 강수빈도의 증가로 입자상 습식침적량이 증가되어 유입량이 증가하기 때문에 기후변화로 인한 토양 평균 농도비는 증가하는 경향이 나타난다.

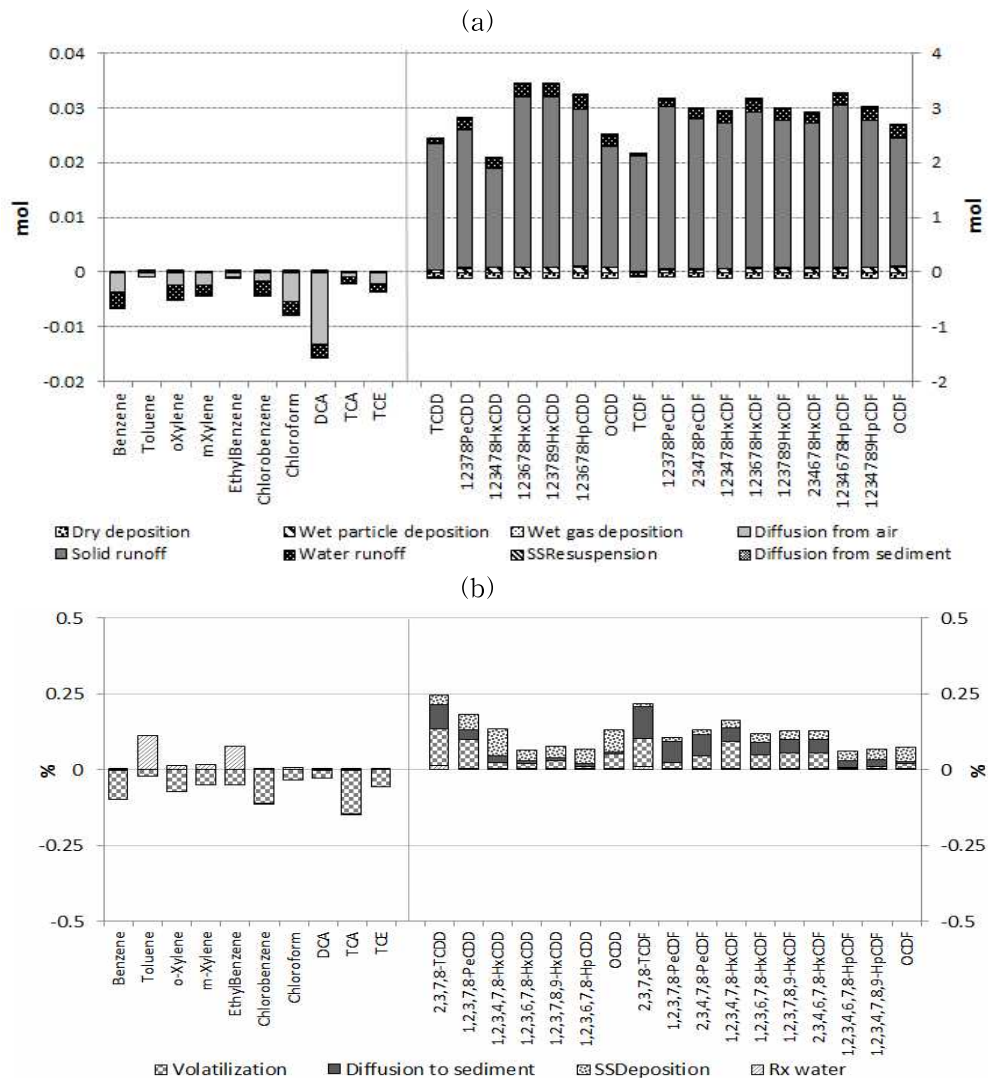
PCDDs/DFs는 토양에서 기후변화 후 강수량 증가로 늘어난 오염물의 유입량을 대부분 토사 유출에 의하여 수체로 이동하게 된다. K_{ow} 값이 클수록 입자의 유기물로의 분배가 커져서 수체로의 토사 유출량 증가에 영향을 미친다. 농경지의 경우는 토양깊이가 다른 토양에 비해 깊어서 기후변화 후 토양 농도 증가폭이 가장 크다 (<그림11-(b)> 참조). 또한 대체로 토양 농도가 감소하는 VOCs일지라도 그 중 헥리상수가 낮은 오염물질에 대해서는 다른 농도 유형을 가지기 때문에 이러한 물리화학적 특징을 고려한 관리가 필요할 것이다.

3) 수체

기후변화로 인한 VOCs의 수체 평균 농도비는 0.9 이내의 감소를 보였다(<그림 12-(a)> 참조). 수체는 대기과 토양으로부터 오염물이 유입되는데, VOCs의 경우는 약 70%가 대기 기원으로 대부분 대기로부터 흡수에 의해 유입되며 기후변화 후 그 유입량이 감소하였다. 이는 기후변화로 인하여 바람에 의한 제거가 커짐에 따라 VOCs의 대기 농도가 감소되므로 수체로 들어오는 유입량 또한 감소된 것으로 기후변화로 인한 VOCs의 마지막 10년 동안의 수체 평균 농도비는 감소되었다(<그림 12-(a)> 참조).

반면 PCDDs/DFs의 경우는 기후변화로 인한 수체 평균 농도비가 1.1배 이내로 증가한다. 기후변화 후 토양으로부터 강우 유출과 토사 유출에 의한 유입프로세스 비중이 커지면서 수체 농도의 변화는 대기 농도 변화로부터 영향을 덜 받게 된다. 대부분의 오염물이 토양으로부터 유입되며 특히 토사 유출에 의한 유입의 증가가 약 92% 이상을 차지한다. 또한 <그림 27>과 같이 VOCs는 기후변화 후 수체의 손실프로세스 중 대기로의 휘발의 기여가 감소하는데 반해 PCDDs/DFs의 경우 대기 로의 휘발이 증가할 뿐 아니라 수체의 손실프로세스 중에서 저토로의 발산과 부유 입자의 침적의 기여가 증가하므로 기후변화 후 수체에서 저토로의 오염물 이동이 증가됨을 알 수 있다.

기상인자와 수체농도비(A1B/NCC)와의 상관관계를 보면, 기상인자 중 월강수량 비와의 상관계수가 0.8이상으로 매우 높은 상관관계를 나타내었다(<표 5> 참조). 따라서 토양 부분의 고찰에서 제시(<표 3>과 <표 4> 참조)된 결과를 함께 고려하면 PCDDs/DFs의 경우 기후변화로 인해 강수량이 증가로 토사 유출에 의한 오염물의 유입이 증가하여 수체 내 오염물 농도를 높이는 결과를 가져온 것임을 알 수 있다. 또한 기후변화로 인한 오염물의 수체 월평균 농도비가 다른 매질에 비해 가장 크고 특히 상위 월평균 농도비의 상위 25%가 2배에서 최고 6배까지 나타나므로 이는 수서생태계 건강에 위협이 될 수 있음을 암시한다.



<그림 27> (a) 기후변화로 인한 수체의 유입프로세스 차이 (A1B-NCC) (단위: mol) (b) 모형 실행 기간 동안의 총유입량으로 정규화한 수체 손실프로세스 기여율의 기후변화전후 차이(A1B-NCC) (단위: %)

(Dry deposition: 입자상 오염물의 건식침적/ Wet particle deposition: 입자상 오염물의 습식침적/ Wet gas deposition: 가스상 오염물의 습식침적/ Diffusion from air: 대기로부터의 오염물의 흡수/ Solid runoff: 강우 발생 시 발생하는 입자상 오염물의 토사 유출/ Water runoff: 강우 발생 시 발생하는 용존상 오염물의 강우 유출/ SSResuspension: 저토에서 수체로의 입자상 오염물의 재부유/ Diffusion from sediment: 저토에서 수체로의 오염물의 발산/ Volatilization: 대기로의 휘발/ Diffusion to sediment: 수체에서 저토로의 오염물의 발산/ SSDeposition: 수체 내 부유입자 (Suspended Solid)의 침적/ Rx water: 오염물의 수체 내 분해 반응)

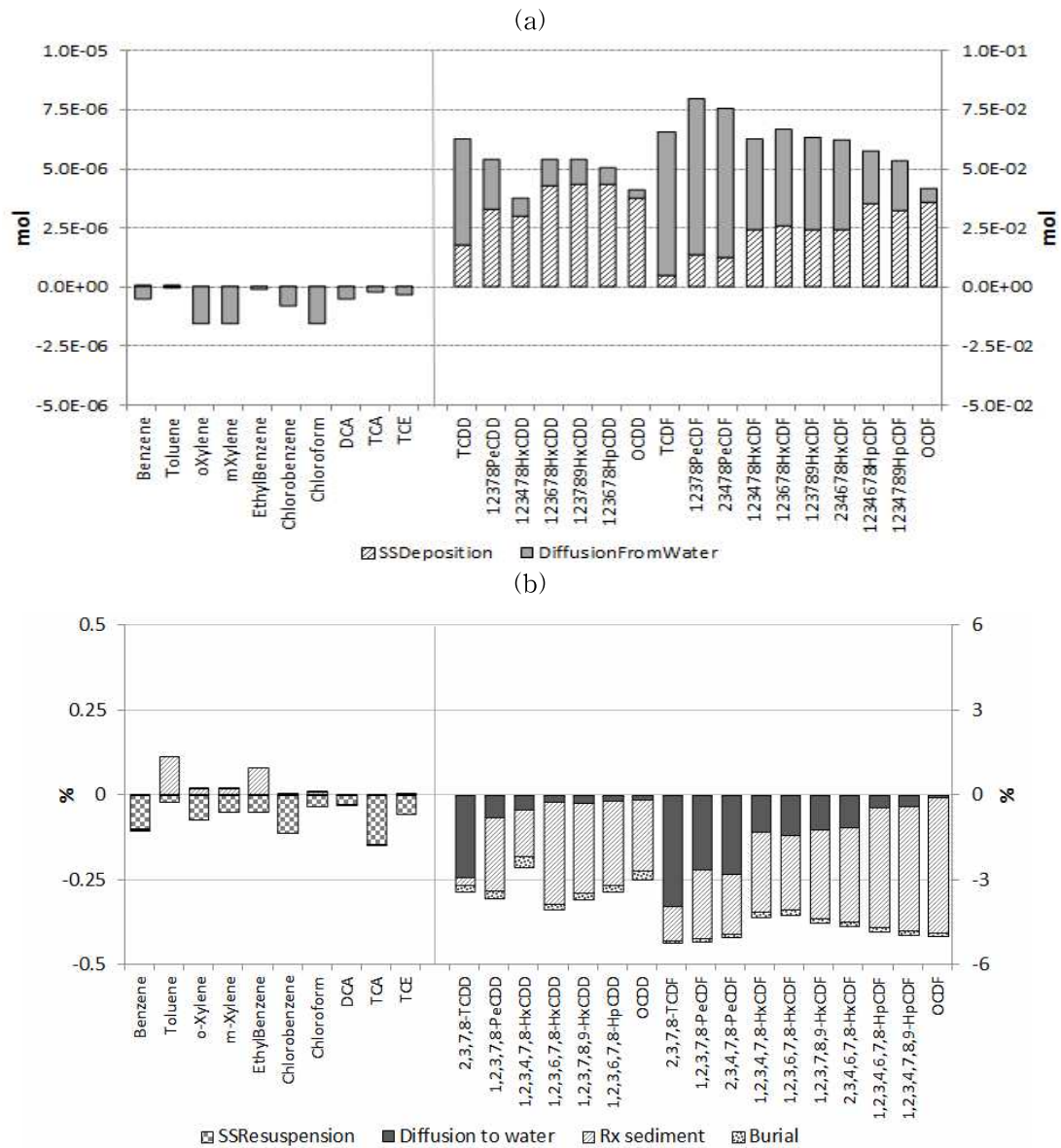
<표 5> 수체 농도비(A1B/NCC)와 기상인자간의 상관관계

	월평균 풍속비	강수빈도비	월강수량비	온도증감량
Benzene	-0.24	0.54	0.65	-0.05
Toluene	-0.39	0.53	0.63	0.07
o-Xylene	-0.19	0.57	0.70	-0.04
m-Xylene	-0.14	0.54	0.68	-0.14
EthylBenzene	-0.30	0.58	0.68	0.08
ChloroBenzene	-0.21	0.61	0.72	0.08
Chloroform	-0.20	0.54	0.70	-0.04
DCA	-0.25	0.55	0.66	0.00
TCA	-0.10	0.59	0.75	0.00
TCE	-0.11	0.56	0.73	-0.06
2,3,7,8-TCDD	0.09	0.63	0.80	0.08
1,2,3,7,8-PeCDD	0.08	0.63	0.79	0.09
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.06	0.61	0.77	0.10
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.08	0.63	0.81	0.09
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.08	0.63	0.81	0.09
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.07	0.63	0.80	0.09
OCDD	0.06	0.62	0.79	0.09
2,3,7,8-TCDF	0.10	0.62	0.80	0.07
1,2,3,7,8-PeCDF	0.10	0.63	0.80	0.08
2,3,4,7,8-PeCDF	0.09	0.63	0.80	0.08
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.08	0.63	0.81	0.08
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.09	0.63	0.80	0.08
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.08	0.63	0.80	0.08
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.08	0.63	0.80	0.08
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.08	0.64	0.81	0.08
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.08	0.63	0.81	0.09
OCDF	0.06	0.63	0.81	0.09

4) 저토

저토에서 오염물의 유입은 모두 수체로부터 기원되므로 간접적으로 기후변화의 영향을 받게 된다. VOCs의 경우 기후변화로 인한 수체 농도비는 0.9 이내로 감소한다(<그림 12-(b)> 참조). 이는 기후변화 후 수체로부터 발산되어 들어오는 오염물질 자체가 감소하였기 때문에 기후변화 후 VOCs의 저토 농도는 감소한다. PCDDs/DFs의 경우 기후변화 후 저토 평균 농도비는 1.2배 정도의 증가를 보이며 월평균의 마지막 10년 평균 농도비는 다른 매질에 비해 가장 크다(<그림 12-(b)> 참조). <그림 28>과 같이 PCDDs/DFs는 수체로부터의 발산과 수체 내 부유입자의 침적에 의하여 저토로 유입되는 오염물질이 기후변화 후 증가하게 된다. 또한 저토로 들어오는 총 유입량에 대하여 저토 내 분해반응과 수체로의 발산에 의하여 주로 손실되는 프로세스의 기여율은 기후변화 후 감소하게 되므로 오염물이 저토 내에 축적되게 된다. 따라서 PCDDs/DFs의 경우 기후변화 후 토사 유출량의 증가로 수체로 유입되는 오염물질이 증가하고 이에 따라 저토내로 이동하게 되면 저토 내 잔류량이 증가한다.

<표6>과 같이 A1B시나리오에 의한 매질 간 상관관계를 살펴보면, PCDDs/DFs의 경우 저토의 농도는 토양 농도와 0.9 이상의 높은 상관관계를 나타내었으며, 기후변화에 따른 저토와 토양의 농도비(A1B/NCC) 간의 상관계수는 대부분 음의 상관관계를 나타내었으나 그 상관관계가 높지 않았다. 따라서 저토 농도의 경우 토양 농도의 증가에 따라 그 농도가 증가됨으로 PCDDs/DFs의 경우 토양으로 유입된 오염물질이 수체를 거쳐 저토에 축적됨을 알 수 있고, 기후변화로 증가한 토사 유출에 의해 수체로 유입된 오염물이 저토로 유입되어 기후변화 후 저토의 농도비를 증가시킬 수 있다.



<그림 28> (a) 기후변화로 인한 저토의 유입프로세스 차이 (A1B-NCC) (단위: mol) (b) 모형 실행 기간 동안의 총유입량으로 정규화한 저토 손실프로세스 기여율의 기후변화전후 차이(A1B-NCC) (단위: %)

(SSDeposition: 수체 내 입자상 오염물의 저토로의 침적/ Diffusion from water: 수체에서 저토로의 오염물의 발산/ SSResuspension: 저토에서 수체로의 입자상 오염물의 재부유/ Diffusion to water: 저토에서 수체로의 오염물의 발산/ Rx sediment: 오염물의 저토 내 분해 반응/ Burial: 저토 하부로
의 오염물의 퇴적)

<표 6> 저토와 토양의 농도(A1B) 및 농도비(A1B/NCC) 간 상관계수

	A1B시나리오		A1B/NCC	
	나대지	숲토양	나대지	숲토양
Benzene	0.14	0.21	-0.66	-0.64
Toluene	0.22	0.29	-0.14	-0.04
o-Xylene	-0.07	0.21	-0.69	-0.62
m-Xylene	0.34	0.33	-0.64	-0.55
EthylBenzene	0.04	0.23	-0.28	-0.14
Chlorobenzene	-0.62	-0.14	-0.77	-0.72
Chloroform	-0.19	0.05	-0.67	-0.61
DCA	0.15	0.00	-0.66	-0.73
TCA	-0.44	-0.17	-0.70	-0.64
TCE	-0.24	-0.04	-0.65	-0.62
2,3,7,8-TCDD	0.97	0.96	-0.18	-0.71
1,2,3,7,8-PeCDD	0.98	0.97	0.06	-0.54
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.98	0.98	0.49	0.03
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.97	0.96	-0.12	-0.61
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.97	0.96	-0.08	-0.58
1,2,3,6,7,8-HpCDD	0.97	0.96	0.11	-0.41
OCDD	0.98	0.97	0.28	-0.14
2,3,7,8-TCDF	0.93	0.93	-0.54	-0.71
1,2,3,7,8-PeCDF	0.96	0.95	-0.39	-0.71
2,3,4,7,8-PeCDF	0.96	0.96	-0.37	-0.72
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.97	0.96	-0.23	-0.65
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.97	0.96	-0.18	-0.65
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.97	0.96	-0.24	-0.67
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.97	0.96	-0.25	-0.69
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.97	0.95	-0.21	-0.71
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.97	0.95	-0.19	-0.68
OCDF	0.96	0.95	-0.15	-0.56

VI. 결론

1. 결론

본 연구에서는 서로 뚜렷하게 다른 물리화학적 특성을 가진 휘발성 유기화합물과 PCDDs/DFs를 대상으로 기후변화 영향에 따라 나타나는 환경 중 동태 차이를 모형을 통하여 비교 평가하고자 하였다.

기후변화에 따른 대기 농도비는 모두 감소하였지만 VOCs는 바람에 의한 제거의 증가가 가장 중요한 감소이유였고, PCDDs/DFs의 경우는 기후변화로 인한 강수 패턴의 변화 중 특히 강수빈도의 증가로 인해 입자상 습식침적에 의하여 입자상 분배율이 큰 오염물질수록 대기에서 하부매질로의 이동을 증가시켰다. 토양의 경우 PCDDs/DFs는 강우량의 증가로 인하여 증가한 오염물질의 유입량을 대부분 토사 유출에 의하여 수체로 이동시키게 되므로 수체의 농도를 증가시키게 된다. 특히 입자상 유기물로의 분배가 큰 물질일수록 더 많은 오염물질의 양을 수체로 증가시키게 되며, 이는 결국 저토로 축적이 되어 기후변화로 인한 저토의 농도비가 가장 크게 증가되게 된다. 대기 중 VOCs는 바람에 의한 제거가 커서 모든 매질에서 기후변화 후 마지막 10년의 평균 농도비는 감소하는 경향을 가지지만 DCA와 같이 다른 VOCs들에 비해 헨리상수가 작은 화학물질일 경우 토양에서 농도가 증가하는 유형이 나타나므로 이러한 서로 다른 물리화학적 특성을 고려하는 화학물질의 관리가 이루어져야 할 것이다.

따라서 기후변화로 인한 기상 요인의 변화 중에서 강수량 및 강수빈도의 영향이 온도보다 직접적으로 기후변화로 인한 화학물질의 환경 중 동태에 영향을 미쳤고, 대기에서 VOCs는 풍속의 증가가 가장 큰 요인으로 작용하게 된다. 휘발성이 강한 VOCs보다 환경 중 입자상으로 대부분 존재하는 PCDDs/DFs가 강수량 및 강수빈도의 증가로 대기에서 하부매질로의 습식침적이 증가하여 토양과 수체, 저토의 농도를 증가시키므로 수체 및 저토 환경에 있어서는 PCDDs/DFs가 기후변화에 따른 농도 증가의 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 특히 PCDDs/DFs 중에서도 입자상

및 유기물로의 분배 경향이 높은 물질일수록 수서 및 저토로 축적되며 수체의 경우 기후변화로 인한 농도의 증가폭이 최대 6배 증가하기 때문에 이는 수질에 영향을 미칠 수 있음을 암시한다. 따라서 음용수나 수서생태계에 영향을 미치게 되고 저서 생태계에도 영향을 미치게 되므로 낙엽에 의한 제거 등 토양으로의 오염물질 유입의 관리 및 토사 유출 중심의 관리가 중요할 것으로 보인다.

2. 연구의 한계와 추후 연구의 필요성

본 연구에서 기후변화를 적용하기 위해 KPOP-CC 다매체 모형에 반영하여 사용된 기상자료는 기후변화 시나리오에 의해 예측될 수 있는 다양한 기상자료 중 하나의 가능성을 나타내는 자료이다. 따라서 본 연구의 결과가 앞으로 일어날 수 있는 기상 변화의 다양한 경우에 적용될 수 있는지 확인하고, 현재 사용된 기상조건 외 다른 극기상조건(extreme event)에서 오염물의 환경 중 동태가 어떻게 달라질 것인지 확인하기 위하여 다양한 기후변화 시나리오에 따른 기상 자료를 사용한 비교연구가 필요할 것이다. 또한 기존에 관심을 받아왔던 유해화학물질들의 물성 대부분 포함하는 범위에서 서로 뚜렷이 구분되는 물리화학적 특성을 가진 두 화학물질인 VOCs와 PCDDs/DFs를 본 연구에서 대상 화학물질로 선택하였는데 본 연구로 밝혀진 화학물질의 물성에 따른 기후변화 영향을 고찰하여 물성 범위 내에 있는 다른 화학물질들까지 포괄하는 연구가 진행되어야 할 것이다. 또한 새롭게 주목되고 있는 잔류성유기화합물(New POPs) 등에 대하여 본 연구를 토대로 화학물질을 확장하여 연구 되어져야 할 것이다.

본 연구에서는 서울 지역을 포함하는 하나의 격자를 대상으로 3시간별 기상자료를 월평균 한 농도 값을 주로 사용하였다. 특히 본 연구의 결과 중 수체에서 기후변화로 인한 월평균 농도비가 최대 6배까지 나타났는데 이는 기후변화가 인체와 수서생태계의 건강에 심각한 위협이 될 가능성이 있음을 보여주므로 시간 해상도를 달리 함으로써 오염물의 환경 중 노출의 영향을 보다 정확히 분석하는 것이 필요할 것이다. 또한 이러한 시간적 해상도 변화에 대한 고려와 더불어 공간적 확장을 통한 비교가 필요할 것이다. 본 연구의 목적은 화학물질의 물성인자와 기후변화로 인한 기상인자의 변화를 중심으로 살펴보고자 하였으나 화학물질의 환경 중 동태는 환경인자의 영향을 동시에 받는다. 따라서 공간의 확장을 통하여 기후변화에 따른 화학물질의 환경인자까지의 영향을 비교할 수 있을 것이다.

또한 본 연구에서는 화학물질의 배출량 조건을 서울 지역을 포함하는 격자에서만 대기를 통해 배출($1 \times 10^{-3} \text{ mol/h}$)하도록 하였다. 이를 통하여 일정한 배출 조건하에

서 화학물질의 물성인자와 기상인자의 영향을 보다 이해할 수 있었지만 배출량의 크기, 분석 지역의 자체 배출량과 외부 지역 배출의 유무와 배출량 정도 등 다양한 배출 조건 등에 따라서도 화학물질의 환경 중 동태에 변화를 가지고 올 것이다. 따라서 향후 환경 중에 오염물이 배출될 때 배출 조건에 따라 기후변화영향이 환경 중 동태에 어떠한 변화와 차이를 일으키는지에 대한 연구가 필요할 것이다.


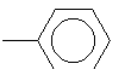
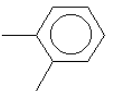
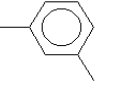
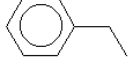
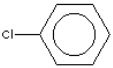


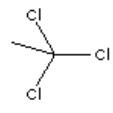
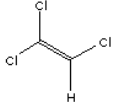
■ 참고문헌

- 김병훈, 이지윤(2010), 국내 잔류성 유기오염물질(POPs)의 정책 및 관리 방향, 기획특집:잔류성 오염물질(Persistent Organic Pollutants, POPs) 국내 관리현황, 공업화학 전망, 제 13권 제5호.
- 김선아(2011), 기후변화의 영향을 고려한 Benzo[a]Pyrene 의 국가규모 다매체 동태의 평가, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문.
- 이동수, 이윤아, 김희석, 송하나(2012), 기후변화에 따른 화학물질 거동 및 위해성 평가·적응기술 개발, 2차년도 보고서, 환경부.
- Beyer, A., Wania, F., Gouin, T., Mackay, D., Natthies, M.(2003), Temperature Dependence of the Characteristic Travel Distance, *Environmental Science & Technology* 37, 766-771
- Bloomfield, J. P., Williams, R. J., Goody, D. C., Cape, N. J. and Guha, P.(2006), Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater – a UK perspective. *Science of the Total Environment* 369, 163 - 177.
- Breivik, K., Wania, F., Muir, D. C. G., Alaee, M., Bakus, S., and Pacepavicius, G.(2006), Empirical and modeling evidence of the long-range atmospheric transport of decabromodiphenyl ether. *Environmental Science & Technology* 40, 4612 - 4618.
- D. Ehhalt, M. Prather et.(2001), IPCC Third Assessment Report – Climate Change 2001, Intergovernmental Panel on Climate Change, 257-258.
- Dalla Valle M. , Codato E. , Marcomini A.(2007), Climate change influence on POPs distribution and fate: A case study , *Chemosphere* 67 (2007) 1287 - 1295.
- EC(2004), European Union System for the Evaluation of Substance 2.0 (EUSES 2.0). Prepared for the European Chemicals Bureau by National Institute of Public Health and the Environment(RIVM), Bilthoven, The Netherlands(RIVM Report No. 601900005).
- Eckhardt, S., Breivik, K., Manø, S., and Stohl, A.(2007). Record high peaks in PCB concentrations in the Arctic atmosphere due to long-range transport of biomass

- burning emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics* 7, 4527 - 4536.
- Halsall, C.J., Gevao, B., Howsam, M., Lee, R.G.M., Ockenden, W.A., Jones, K.C.(1999), Temperature dependence of PCBs in the UK atmosphere. *Atmos. Environ.* 33, 541 - 552.
- Goss, K., and S. J. Eisenreich(1997), Sorption of Volatile Organic Compounds to Particles from a Combustion Source at Different Temperatures and Relative Humidities, *Atmospheric Environment*, 31(17), 2877-2834.
- IPCC(2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller(eds), contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and NJew York, NY, USA, p.996
- Lamon, L., Dalla Valle, M., Critto, A., Marconmini, A.(2009), Introducing an integrated climate change perspective in POPs modeling, monitoring and regulation, *Environmental Pollution* 157, 1971-1980
- Lee, Y. A., Lee, D.S., Kim, S.K., Kim, Y.K., Kim, D.H.(2004), Use of the relative concentration to evaluate a multimedia model, POPsME, for PAHs in the absence of emission estimates, *Environ. Sci. Technol.* 38, 1079-1088.
- Lee, Y. A.(2005), *Regional Scale Assessment of Assessment of Environmental Fate and Transport of dioxins by a Multimedia Model(KoEFT-PBTs)*, Doctoral Thesis, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University
- Ma, J., Hung, H., and Blanchard, P.(2004), How do climate fluctuations affect persistent organic pollutant distribution in North America? Evidence from a decade of air monitoring. *Environmental Science & Technology* 38, 2538 - 2543.
- Macdonald, R.W., Harner, T., Fyfe, J., Loeng, H., Weingartner, T.(2003), *AMAP Assessment 2002: The influence of global change on contaminant pathways to, within, and from the Arctic*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. pp. xii+65.

- Macdonald, R. W., Harner, T., and Fyfe, J.(2005). Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data. *Science of the Total Environment* 342, 5 - 6.
- Macdonald, R.W., Harner T., Fyfe, J.(2005), Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data, *Science of the Total Environment* 342, 5-86
- Macdonald, R.W., Harner, T., Fyfe, J.(2005), Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data. *Sci. Total Environ.* 342, 5 - 86.
- Mackay, D., S. Paterson, and W. H. Schroeder(1986), Model describing the rates of transfer processes of organic chemicals between atmosphere and water, *Environ. Sci. Technol.*, 20, 810-816.
- Macay, D.(2000), *Handbook of Physical-chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals*CRC Press LLC
- Macleod, M., Scheringer, M., Podey, H., Jones, C.K., Hungerbühler, K.(2007), The origin and significance of short-term variability of semivolatile contaminants in air, *Environmental Science & Technology* 41, 3249-3253
- Pankow, J. F.(1987), Review and comparative analysis of the theories on partitioning between the gas and aerosol particulate phases in the atmosphere, *Atmospheric Environmental*. Vol. 21, No. 11, PP. 2275-2283
- Pankow, J. F.(1994), An Absorption model of gas/particle partitioning of organic compounds in the atmosphere, *Atmospheric Environment*, 28(2), 185-188.
- Paasivirta, Jaakko., Sinkkonen, Seija., Mikkelsen, Pirjo., Rantio, Tiina., Wania, Frank.(1999), "Estimation of vapor pressures, solubilities and Henry's law constants of selected persistent organic pollutants as functions temperature, *Chemosphere* 39(5), 811-832.
- Schwarzenbach, R., Gschwend, P. M., and Imboder, D. M.(2003). *Environmental Organic Chemistry*, second ed. Wiley Interscience, New Jersey.

<부록 1> 대상 화학물질인 VOCs의 물리화학적 성질 (1)

Chemical	CAS No.	Chemical Formula		Molecular weight	Boiling point	Molar Volume
				g/mol	°C	cm³/mol
Benzene	71-43-2	C ₆ H ₆		78.11	80.1	96
Toluene	108-88-3	C ₇ H ₈		92.13	110.6	118
o-Xylene	95-47-6	C ₈ H ₁₀		106.2	144	140.4
m-Xylene	95-47-6	C ₈ H ₁₀		106.2	139.3	140.4
Ethylbenzene	100-41-4	C ₈ H ₁₀		106.2	136.2	140.4
Chlorobenzene	108-90-7	C ₆ H ₅ Cl		112.56	125.7	116.9
Chloroform	67-66-3	CHCl ₃		112.6	61.2	92
1,2-Dichloroethane (DCA)	107-06-2	C ₂ H ₄ Cl ₂		98.96	83.5	94
1,1,1-Trichloroethane (TCA)	71-55-6	C ₂ H ₃ Cl ₃		133.42	74	115
Trichloroethylene (TCE)	79-01-6	C ₂ HCl ₃		131.4	86.7	107

<부록 2> 대상 화학물질인 VOCs의 물리화학적 성질 (2)

Chemical	LogKow	Log(P, Bar)*			Temperature dependence constant for Henry's Law constant**	RxOHair [1/h]***	RxSoil [1/h]****	RxWater [1/h]****	RxSed [1/h]****	RxVeg [1/h]****
		A	B	C						
Benzene	2.13	4.01814	1203.835	-53.226	4300	2.00E-12	7.52E-04	1.81E-03	1.13E-03	7.52E-03
Toluene	2.78	4.142	1377.578	-50.507	1900	5.50E-12	7.22E-03	2.89E-02	1.08E-02	7.22E-02
o-Xylene	3.13	4.938	1903.373	-26.268	3400	6.90E-12	4.08E-04	1.03E-03	6.12E-04	4.08E-03
m-Xylene	3.2	5.092	1996.545	-14.772	4200	1.40E-11	4.08E-04	1.03E-03	6.12E-04	4.08E-03
EthylBenzene	3.15	4.075	1419.315	-60.539	1700	6.90E-12	4.13E-03	1.44E-02	6.19E-03	4.13E-02
ChloroBenzene	2.83	4.111	1435.675	-55.124	2100	1.40E-12	2.57E-04	1.93E-04	3.85E-04	2.57E-03
Chlorform	2.84	4.208	1233.129	-40.953	4500	1.15E-13	1.26E-04	4.08E-04	1.89E-04	1.26E-03
DCA	1.48	4.585	1521.789	-24.67	4200	2.20E-13	1.26E-04	4.08E-04	1.89E-04	1.26E-03
TCA	2.49	5.886	2210	34.902	3900	2.20E-14	7.91E-05	2.06E-04	6.42E-05	7.91E-04
TCE	2.61	3.553	974.538	-85.811	4600	2.30E-12	8.02E-05	8.99E-05	1.20E-04	8.02E-04

* Liquid vapor pressure, $\log P = A - (B/(T-C))$

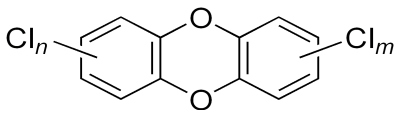
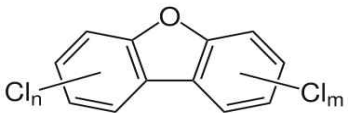
** $k_H(T) = k_H^o \exp(d(\ln(k_H))/d(1/T)((1/T) - 1/(298.15K)))$ k_H ; Henry's Law constant
 $d\ln(k_H)/d(1/T) = \text{Temperature dependence constant (K)}$

$k_H^o = \text{Henry's law constant for solubility to water at } 298.15K (\text{mol/kg})$

*** RxOHair ; 대기 중 하이드록시라디칼과의 1차 반응속도상수

**** RxSoil, RxWater, RxSed, RxVeg ; 각 토양, 수체, 저토, 식생의 1차 반응속도상수

<부록 3> 대상 화학물질인 PCDDs/DFs의 물리화학적 성질 (1)

Chemical	CAS No.	Chemical Formula	Molecular weight g/mol	Boiling point °C	Molar Volume cm ³ /mol
Dioxins					
2,3,7,8TCDD	1746-01-6	C ₁₂ H ₄ Cl ₄ O ₂	3.22E+02	446.5	275.6
1,2,3,7,8PCDD	40321-76-4	C ₁₂ H ₃ Cl ₅ O ₂	3.56E+02	464.7	296.5
1,2,3,4,7,8HxCDD	39227-28-6	C ₁₂ H ₂ Cl ₆ O ₂	3.91E+02	487.7	317.4
1,2,3,6,7,8HxCDD	57653-85-7	C ₁₂ H ₂ Cl ₆ O ₂	3.91E+02	487.7	317.4
1,2,3,7,8,9HxCDD	19408-74-3	C ₁₂ H ₂ Cl ₆ O ₂	3.91E+02	487.7	317.4
1,2,3,4,6,7,8HpCDD	35822-46-9	C ₁₂ HCl ₇ O ₂	4.25E+02	507.2	338.3
1,2,3,4,6,7,8,9OCDD	3268-87-9	C ₁₂ Cl ₈ O ₂	4.60E+02	510	359.2
Furans					
2,3,7,8TCDF	51207-31-9	C ₁₂ H ₄ Cl ₄ O	3.06E+02	438.3	260.3
1,2,3,7,8PCDF	57117-41-6	C ₁₂ H ₃ Cl ₅ O	3.40E+02	464.7	281.2
2,3,4,7,8PCDF	57117-31-4	C ₁₂ H ₃ Cl ₅ O	3.40E+02	464.7	281.2
1,2,3,4,7,8HxCDF	70648-26-9	C ₁₂ H ₂ Cl ₆ O	3.75E+02	487.7	302.1
1,2,3,6,7,8HxCDF	57117-44-9	C ₁₂ H ₂ Cl ₆ O	3.75E+02	487.7	302.1
1,2,3,7,8,9HxCDF	72918-21-9	C ₁₂ H ₂ Cl ₆ O	3.75E+02	487.7	302.1
2,3,4,6,7,8HxCDF	60851-34-5	C ₁₂ H ₂ Cl ₆ O	3.75E+02	487.7	302.1
1,2,3,4,6,7,8HpCDF	67562-39-4	C ₁₂ HCl ₇ O	4.09E+02	507.2	323
1,2,3,4,7,8,9HpCDF	55673-89-7	C ₁₂ HCl ₇ O	4.09E+02	507.2	323
1,2,3,4,6,7,8,9OCDF	39001-02-0	C ₁₂ Cl ₈ O	4.44E+02	537	343.9

<부록 4> 대상 화학물질인 PCDDs/DFs의 물리화학적 성질 (2)

Chemical	LogKow	Log(P _L , Pa)*		Log(H, Pa m ³ /mol)**		RxOHair [1/h]***	RxSoil [1/h]****	RxWater [1/h]****	RxSed [1/h]****	RxVeg [1/h]****
		A	B	A	B					
PCDD										
2,3,7,8TCDD	6.80	4392	11.42	4388	15.02	1.05E-12	1.11E-06	2.50E-04	1.11E-07	1.11E-06
1,2,3,7,8PCDD	7.40	4778	11.90	4522	15.32	5.60E-13	1.00E-06	1.39E-04	1.00E-06	1.00E-06
1,2,3,4,7,8HxCDD	7.80	4840	11.75	4978	16.08	2.70E-13	4.17E-07	6.76E-05	4.17E-07	4.17E-07
1,2,3,6,7,8HxCDD	7.80	4803	11.41	4936	15.92	2.70E-13	1.82E-06	6.76E-05	1.82E-06	1.82E-06
1,2,3,7,8,9HxCDD	7.80	4957	12.01	5090	16.60	2.70E-13	1.43E-06	6.76E-05	1.43E-06	1.43E-06
1,2,3,4,6,7,8HpCDD	8.00	5017	11.91	5621	17.95	1.30E-13	1.11E-06	3.33E-05	1.11E-06	1.11E-06
1,2,3,4,6,7,8,9OCDD	8.20	4676	11.20	4004	13.27	5.00E-14	7.69E-07	1.27E-05	7.69E-07	7.69E-07
PCDF										
2,3,7,8TCDF	6.10	4344	11.46	3908	13.24	6.10E-13	1.82E-06	1.56E-04	1.82E-06	1.82E-06
1,2,3,7,8PCDF	6.50	4504	11.54	4392	14.11	3.00E-13	2.22E-06	7.58E-06	2.22E-06	2.22E-06
2,3,4,7,8PCDF	6.50	4607	11.70	4468	14.69	3.00E-13	1.82E-06	7.58E-06	1.82E-06	1.82E-06
1,2,3,4,7,8HxCDF	7.00	4655	11.54	4832	16.35	1.40E-13	1.67E-06	3.57E-05	1.67E-06	1.67E-06
1,2,3,6,7,8HxCDF	7.00	4645	11.49	4816	15.91	1.40E-13	1.43E-06	3.57E-05	1.43E-06	1.43E-06
1,2,3,7,8,9HxCDF	7.00	4643	11.51	4816	16.00	1.40E-13	2.00E-06	3.57E-05	2.00E-06	2.00E-06
2,3,4,6,7,8HxCDF	7.00	4629	11.49	4801	15.93	1.40E-13	2.22E-06	3.57E-05	2.22E-06	2.22E-06
1,2,3,4,6,7,8HpCDF	7.40	4735	11.49	5211	16.42	6.00E-14	2.86E-06	1.56E-05	2.86E-06	2.86E-06
1,2,3,4,7,8,9HpCDF	7.40	4777	11.43	5241	16.62	6.00E-14	3.33E-06	1.56E-05	3.33E-06	3.33E-06
1,2,3,4,6,7,8,9OCDF	8.00	4805	11.24	4537	14.59	3.00E-14	4.00E-06	5.21E-06	4.00E-06	4.00E-06

* Subcooled liquid vapor pressure; $\log P_L = -A/T+B$

** Henry's law constant ; $\log H = -A/T+B$

*** RxOHair ; 대기에서 하이드록시라디칼과의 1차 반응속도상수

**** RxSoil, RxWater, RxSed, RxVeg ; 각 토양, 수체, 저토, 식생의 1차 반응속도상수

Abstract

Assessment of Climate Change Impacts on
Multimedia Distribution of PCDDs/DFs and VOCs

Advised by
Prof. Lee, Dong Soo

August, 2013

submitted by
Chang, Lia

Department of Environmental Planning Graduate School of
Environmental Studies
Seoul National University

The influence of climate change on multimedia distributions of 17 PCDDs/DFs 2,3,7,8-substituted congeners and 10 VOCs was assessed using predictions by a region-specific multimedia fate model (Persistent Organic Pollutants under Climate Change Conditions in Korea, KPOP-CC). Two simulation were performed, one with 3-hour meteorological data obtained from climatic simulation for the period 2000–2050 driven by SRES A1B scenario (A1B run), and the other with a current climatic condition (NCC run) in South Korea.

In this study, monthly averaged concentrations in environmental media (i.e. air, soil, water and sediment) and inter-media flux for Seoul area were analyzed.

Monthly averaged concentrations of VOCs and PCDDs/DFs in air from A1B run were slightly lower than those from NCC run. The increase in advective flow due to increased wind speed contributed to the decrease of VOCs concentrations in air, while the increased wet particle deposition caused by the increase in precipitation frequency was found to be the main driving factors for those variation of PCDDs/DFs. As the number of chlorine increases, the fraction of particle-bound chemical increases, leading to the increase of wet particle deposition from air.

In soil, concentrations of VOCs from A1B run slightly decreased compared with those from NCC run. The decrease in air concentrations of VOCs resulted in the decreased intermedia flux from air to soil. However, concentrations of PCDDs/DFs in soil increased up to 10%, which was caused by the increased wet particle deposition flux.

Climate change-induced variations in concentrations of VOCs in water and sediment, reflected the decreased concentrations in air and soil. On the other hand, increased soil concentrations of PCDDs/DFs resulted in the increased solid runoff, leading to the significant increase in the concentrations in water and

subsequently in sediment.

These results suggest that climate change (e.g. precipitation frequency and intensity) can potentially raise the risk of both human and aquatic ecosystem health within the meteorological and environmental settings of South Korea.

◆ Key words : multimedia fate, climate change, VOCs, PCDDs/DFs, multimedia fate model

◆ Student Number : 2010-22335

감사의 글

‘흔들리지 않고 젖지 않고 피는 꽃이 어디 있으랴..’

제 방 책상위에는 도종환 시인의 시 구절을 딴 이 메모가 항상 붙어있습니다. 흐릿하게 연필로 쓰여진 그 글씨가 시간이 지나도 언제나 선명하게 다가와 항상 그 자리에 있습니다. 석사 논문을 마무리하는 지금 하나의 꽃을 피웠습니다. 그리고 그 꽃을 피우기 위해선 스스로 결코 필수 없고 누군가는 심고 누군가는 물을 주고 햇빛을 주어야 한다는 것을 배웠기에 그 감사한 마음을 표현하려 합니다.

이동수 교수님, 표현이 적은 제자이지만 교수님을 진심으로 존경하고 배우고 싶습니다. 포기하지 않고 기다려주시고 지도해주셔서 감사합니다. 이윤아 박사님, 부족한 저를 사랑으로 끝까지 격려해주셔서 감사드립니다. 지금 미칠 수 없는 그 보답을 삶으로 답하겠습니다.

그리고..함께 논문을 쓰고 졸업하는 나의 좋은 동료였던 엔엔, 자은언니, 희석선배님, 지혜언니와 연구실 식구들, 서현교회 동반자반 지체들, 변함없는 믿음과 사랑을 보내 주었던 나의 오랜 지기들, 다 부를 수 없는 제 마음에 있는 고마운 분들에게 앞으로 함께 살아감을 통해 그 고마움을 갚아나가도록 하겠습니다.

마지막으로 나의 사랑하는 가족들에게 감사함을 전합니다. 기도와 사랑으로 키워주신 어머니, 든든하고 사랑하는 동생 샘이. 시간이 지날수록 더욱 그리운 천국에 계신 아버지. 그리고 생명주신 하나님께 영광과 감사를 드립니다.

완주의 기쁨이 커져갈수록 부족했던 저의 노력과 모습이 더욱 보입니다. 이제 다시 걸어가는 이 길 끝에는 정직한 땀과 겸손으로 좋은 열매 맺는 나무가 되겠습니다.